

---

---

Е.А. Аржанников

---

---

**Дистанционный принцип  
в релейной защите  
и автоматике линий при  
замыканиях на землю**

---

---

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

---

---

**Е.А. Аржанников**

**Дистанционный принцип  
в релейной защите  
и автоматике линий при  
замыканиях на землю**



МОСКВА  
«ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ»  
1985

ББК 31.27-05  
А 80  
УДК 621.316.925

Рецензент В.А. Семенов

**Аржанников Е. А.**

**А80 Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 176 с., ил.**

50 к. 7 500 экз.

Рассмотрено использование дистанционного принципа для определения места короткого замыкания (КЗ) на землю в устройствах релейной защиты и автоматики основных сетей высокого и сверхвысокого напряжений. Исследуется поведение реле сопротивления в схемах релейной защиты от всех видов КЗ, однофазного АПВ, в устройствах для определения расстояния до места повреждения.

Для инженеров эксплуатационных и проектных организаций, работников НИИ, а также студентов и аспирантов вузов.

2302040000-229  
А 051(01)-85 109-85

ББК 31.27-05  
6П2.13

© Энергоатомиздат, 1985

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Быстрый рост числа, протяженности и загруженности линий электропередачи вызывает необходимость непрерывного совершенствования систем релейной защиты и автоматики линий. Дистанционный принцип, основанный на замере отношения напряжения к току, всегда был одним из наиболее распространенных принципов защиты линий от коротких замыканий (КЗ) [1]. В книге рассматривается теория и практика использования дистанционного принципа для трех основных целей: выбора поврежденной фазы в устройствах ОАПВ; осуществления одностороннего определения расстояния до места КЗ; осуществления дистанционной защиты линии от однофазных КЗ.

В отечественной литературе имеется большое количество работ, посвященных использованию дистанционного принципа в защитах от междуфазных КЗ. Возможности и особенности дистанционных защит от замыканий на землю рассматриваются гораздо реже, результаты специальных разработок в этой области в течение длительного времени почти не публиковались. Объясняется это длительной существующей ориентацией на использование при КЗ на землю токовых защит нулевой последовательности.

Между тем появляются все новые исследования, позволяющие ставить вопрос о расширении области применения дистанционного принципа. В частности, и в отечественной, и в зарубежной литературе большое внимание уделяется новым типам измерительных органов — многофазным реле сопротивления, позволяющим значительно улучшить характеристики дистанционных защит от замыканий на землю. Переход техники релейной защиты на современную элементную базу позволяет предложить ряд более совершенных алгоритмов выполнения дистанционных устройств. Все это вызывает необходимость осветить современное состояние общих вопросов функционирования дистанционных устройств при замыканиях на землю и конкретные особенности выполнения таких устройств.

В книге рассматриваются общие вопросы выполнения схем компенсации фазных напряжений, оценивается по-

грешность существующих схем на линиях малой и большой протяженности, транспонированных и нетранспонированных. Оценивается влияние на дистанционный замер таких факторов, как наличие переходного сопротивления в месте КЗ, взаимоиндукции в схеме нулевой последовательности, ответвлений от защищаемой линии. Даются рекомендации по совершенствованию схем компенсации.

При рассмотрении применения реле сопротивления в устройствах ОАПВ основное внимание уделено условиям работы реле избирательного органа, способам расчета электрических величин в сложносимметричных режимах цикла ОАПВ, выбору и согласованию характеристик реле. Наряду с дистанционными рассмотрены фильтровые направленные органы, способы анализа их функционирования.

В последнее время все большее внимание уделяется использованию дистанционного принципа для одностороннего определения (фиксации) места повреждения (ООМП). Однако следует заметить, что теоретические разработки в этой области сильно отстают от практических. В книге рассмотрено общее решение задачи устранения влияния переходного сопротивления при ООМП на транспонированной линии малой и большой протяженности. Предложены способы анализа погрешностей ООМП в комплексной плоскости сопротивлений.

При рассмотрении всех вопросов, связанных с ООМП, автор пытался показать применимость для этой цели средств и методов теории дистанционной защиты. Объясняется это уверенностью, что с течением времени две довольно далекие сейчас области техники (определение места повреждения и дистанционная защита) должны перейти на использование единых или сходных алгоритмов, реализуемых на единой элементной базе. Теория дистанционной защиты исторически возникла раньше и в настоящее время развита гораздо глубже, чем теория ООМП. Поэтому естественна попытка при анализе устройств ООМП найти им аналоги среди устройств защиты и рассмотрение возможностей выполнения устройств защиты на основе усовершенствованных алгоритмов ООМП.

Две последние главы посвящены измерительным органам дистанционных защит от однофазных КЗ. Произведено сравнение известных органов между собой, показаны преимущества многофазных реле сопротивления перед однофазными. Описан ряд последних разработок многофазных реле, даются основные методы исследования их функционирования.

Опыт последних лет показывает, что элементная база устройств защиты и автоматики быстро меняется. Поэтому в книге нет подробных описаний отдельных устройств, а основное внимание уделяется разбору алгоритмов действия, разработке методов анализа функционирования устройств, отрабатывающих конкретный алгоритм. Наряду с традиционными для релейной защиты методами исследования (исследование аналитических и экспериментальных зависимостей) широко применялся метод статистических испытаний, связанный с использованием возможностей ЭВМ.

Автор выражает глубокую благодарность кандидатам техн. наук В. А. Семенову и Д. Р. Любарскому за ценные замечания, способствовавшие улучшению рукописи.

Все замечания по книге просьба направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб. 10, Энергоатомиздат.

*Автор*

## Глава первая

### ФИКСАЦИЯ МЕСТА КЗ НА ЗЕМЛЮ НА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ. СХЕМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПЕНСИРОВАННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

#### 1. ФИКСАЦИЯ МЕСТА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КЗ НА ЛИНИИ С ПОФАЗНО-СИММЕТРИЧНЫМИ СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Во всех устройствах, использующих дистанционный принцип для определения места КЗ на землю, одной из сравниваемых величин является компенсированное фазное напряжение  $U'_\phi$ . Если рассматривается КЗ в точке  $K$  на линии электропередачи (рис. 1), то для устройства 1, установленного в точке  $M$  и имеющего уставку  $Z_y$ , компенсированным явится напряжение в точке  $L$ , соответствующей концу зоны действия устройства 1, при условии,

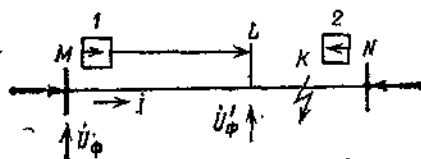


Рис. 1. Схема, поясняющая принцип получения компенсированных напряжений

что линия между точками  $M$  и  $L$  не имеет повреждений (мест несимметрии).

Тогда при приближении точки  $K$  металлического КЗ к точке  $L$  компенсированное напряжение будет уменьшаться, а при совпадении точек  $K$  и  $L$  обратится в нуль. Факт обращения  $U'_\phi$  в нуль позволяет четко фиксировать конец зоны действия устройства.

Для нахождения формулы получения компенсированного напряжения достаточно записать соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений любой фазы на линии рис. 1:

$$U'_{1\phi} = U_{1\phi} - I_{1\phi} Z_{1K};$$

$$U'_{2\phi} = U_{2\phi} - I_{2\phi} Z_{2k};$$

$$U'_{0\phi} = U_{0\phi} - I_{0\phi} Z_{0k},$$

где  $U'_{1\phi}$ ,  $U'_{2\phi}$ ,  $U'_{0\phi}$ ,  $U_{1\phi}$ ,  $U_{2\phi}$ ,  $U_{0\phi}$  — напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей рассматриваемой фазы в точках  $L$  и  $M$ ;  $I_{1\phi}$ ,  $I_{2\phi}$ ,  $I_{0\phi}$  — токи прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте установки устройства;  $Z_{1k}$ ,  $Z_{2k}$ ,  $Z_{0k}$  — сопротивления участка линии между точками  $M$  и  $L$  в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Суммируя левые и правые части всех уравнений, получаем:

$$U'_{\phi} = U_{\phi} - I_{1\phi} Z_{1k} - I_{2\phi} Z_{2k} - I_{0\phi} Z_{0k}.$$

С помощью простейших преобразований упростим данное выражение:

$$U'_{\phi} = U_{\phi} - (I_{1\phi} Z_{1k} + I_{2\phi} Z_{2k} + I_{0\phi} Z_{1k}) - I_{0\phi} (Z_{0k} - Z_{1k}).$$

Поскольку линия транспонирована (все параметры пофазно-симметричны), ее сопротивления в схемах прямой и обратной последовательностей равны между собой:  $Z_{1k} = Z_{2k}$ ;  $I_{1\phi} + I_{2\phi} + I_{0\phi} = I_{\phi}$ . Тогда:

$$U'_{\phi} = U_{\phi} - Z_{1k} \left( I_{\phi} + \frac{Z_{0k} - Z_{1k}}{Z_{1k}} I_{0\phi} \right).$$

Учитывая, что  $I_{0\phi} = I_0$ , а  $Z_{1k}$  является сопротивлением установки устройства  $Z_y$ , имеем окончательное выражение для компенсированного фазного напряжения в виде [7]:

$$U'_{\phi} = U_{\phi} - (I_{\phi} + K I_0) Z_y. \quad (1)$$

В (1) входит  $K$  — величина, называемая коэффициентом компенсации по току нулевой последовательности. Из хода рассуждений следует, что на линии с пофазно-симметричными сосредоточенными параметрами она равна:

$$K = \frac{Z_{0k} - Z_{1k}}{Z_{1k}}. \quad (2)$$

Отметим две важные особенности, следующие из хода приведенных выше рассуждений:

а) выражение (1) верно для любой фазы при любом режиме электрической системы;

б) при выводе учитывалось лишь одно ограничение — между точками  $M$  и  $L$  нет мест несимметрии.



Следовательно, компенсированные напряжения фаз точно соответствуют напряжениям в точке  $L$  независимо от числа, вида и расположения возможных внешних несимметрий. Например, при металлическом однофазном КЗ в точке  $L$  обращается в нуль компенсированное напряжение поврежденной фазы, при металлическом замыкании двух фаз на землю — компенсированные напряжения этих двух фаз. Это имеет место независимо от режима внешней по отношению к участку  $ML$  сети, даже если в этой сети одновременно имеются разрывы или замыкания фаз.

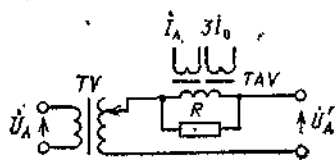


Рис. 2. Схема получения компенсированного напряжения фазы  $A$

Для практического получения компенсированных напряжений в дистанционных устройствах часто используют промежуточные трансформаторы напряжения и трансреакторы, как это показано на рис. 2, где:  $TV$  — промежуточный трансформатор напряжения фазы  $A$ ;  $TAV$  — трансреактор, вторичная ЭДС которого пропорциональна сумме токов  $I_A + KI_0$ ;  $R$  — резистор, обеспечивающий необходимый угол сопротивления установки  $Z_y$  (за счет сдвига по фазе между напряжением на этом резисторе и ЭДС трансреактора в режиме холостого хода схемы компенсации).

Изменение значения  $Z_y$  производится путем изменения числа витков вторичной обмотки трансформатора  $TV$ . Изменение коэффициента  $K$  производится подбором соотношения числа витков двух первичных обмоток трансреактора  $TAV$ .

Возможны разновидности схем компенсации. Например, на схеме рис. 3 компенсация от тока нулевой последовательности вводится в цепи сразу трех фаз с помощью специального трансреактора  $TAV_4$ . В этой схеме коэффициент  $K$  может быть комплексной величиной. Структура выражения (2) в общем случае дает комплексное значение  $K$ , которое в схеме рис. 3 может быть обеспечено подбором сопротивления резистора  $R_4$ .

В связи с широким использованием в последние годы интегральных операционных усилителей в схемах устройств защиты и автоматики имеется тенденция изменения принципов построения схем компенсации. Вариант схемы ком-

пенсации для одной фазы (А), выполненной с использованием операционных усилителей, показан на рис. 4 [2], где:  $UA1, UA2, UA3$  — входные преобразователи ток — напряжение;  $UV1$  — преобразователь напряжение — напряжение;  $A1, A2$  — операционные усилители.

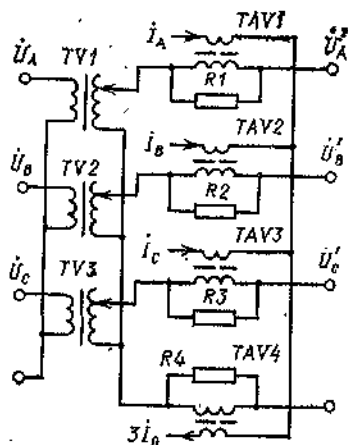


Рис. 3. Схема компенсации с общим для всех фаз трансреактором компенсации по току нулевой последовательности

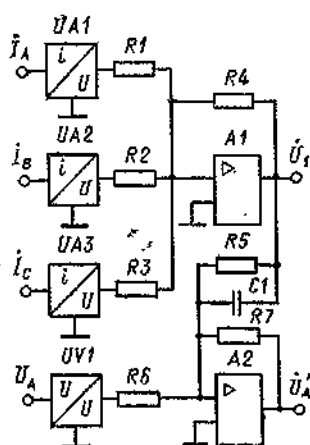


Рис. 4. Схема компенсации с использованием операционных усилителей

На выходе усилителя  $A1$  формируется величина<sup>1</sup>

$$\dot{U}_1 = -m \left( \frac{R_4}{R_1} \dot{I}_A + \frac{R_4}{R_2} \dot{I}_B + \frac{R_4}{R_3} \dot{I}_C \right).$$

В случае равенства сопротивлений резисторов  $R_2=R_3$

$$\dot{U}_1 = -m \frac{R_4(R_2 - R_1)}{R_1 R_2} \left( \dot{I}_A + \frac{3R_1}{R_2 - R_1} \dot{I}_B \right),$$

где  $m$  — коэффициент пропорциональности между током на входе и напряжением на выходе преобразователей  $UA1—UA3$ .

Контур  $R5—C1$  обеспечивает необходимый поворот  $\dot{U}_1$  на угол сопротивления установки  $\varphi_y$ . При этом напряжение на выходе усилителя  $A2$  равно

$$\dot{U}_A' = -n \dot{U}_A \frac{R_7}{R_6} - \dot{U}_1 \left( \frac{R_7}{R_5} + j\omega C_1 R_7 \right),$$

где  $n$  — коэффициент преобразователя  $UV1$ .

<sup>1</sup> В дальнейшем резисторы обозначены  $R1, R2$  и т. д., их сопротивления  $R_1, R_2$  и т. д. То же относится к конденсаторам и катушкам индуктивности.

Если параметры подобраны так, что  $R_7/R_5 = \cos \varphi_y$ , а  $\omega C_1 R_7 = \sin \varphi_y$ , то окончательное выражение для компенсированного напряжения имеет вид:

$$\dot{U}_A = -n \frac{R_7}{R_6} \left[ \dot{U}_A - \frac{m}{n} \frac{R_6 R_4 (R_2 - R_1)}{R_5 R_1 R_2} \left( I_A + \frac{3R_1}{R_2 - R_1} I_0 \right) e^{j\varphi_y} \right].$$

## 2. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ РЕЛЕ, КОЭФФИЦИЕНТ КОМПЕНСАЦИИ КОТОРОГО НЕ РАВЕН РАСЧЕТНОМУ, ПРИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КЗ

При металлических КЗ реле с коэффициентом компенсации, определяемым по выражению (2), имеет на своих зажимах сопротивление

$$\underline{Z}_{\text{к}} = \frac{\dot{U}_\Phi}{I_\Phi + K I_0}.$$

Применяемые в настоящее время реле обычно имеют вещественный коэффициент компенсации по току нулевой последовательности, хотя расчетное значение этого коэффициента по выражению (2) в общем случае является комплексным. Кроме того, выпускаемые промышленностью реле (например, типа КРС-4) позволяют осуществлять только дискретные изменения  $K$ . Поэтому действительный (установленный на реле) коэффициент  $K_d$  может отличаться от расчетного значения  $K$ , что приводит к погрешностям фиксации сопротивления до места КЗ. Рассмотрим характер и значение этих погрешностей.

Сопротивление на зажимах реле, включенного на  $\dot{U}_\Phi$  и  $I_\Phi + K_d I_0$ , равно:

$$\underline{Z}_d = \frac{\dot{U}_\Phi}{I_\Phi + K_d I_0} = \underline{Z}_{\text{к}} \frac{I_\Phi + K I_0}{I_\Phi + K_d I_0} = \underline{Z}_{\text{к}} \left[ 1 + \frac{I_0 (K - K_d)}{I_\Phi + K_d I_0} \right]. \quad (3)$$

Второе слагаемое приведенного выражения определяет отклонение сопротивления на зажимах реле от расчетного значения  $\underline{Z}_{\text{к}}$ , вызванное неточностью установки коэффициента компенсации. Рассмотрим это отклонение в случае установки реле на одиночной линии с двусторонним питанием по схеме рис. 5. Сопротивления линии и систем в схемах прямой и обратной последовательностей принимаем равными между собой. При этом используются следующие обозначения на рис. 5 и в приложении П1:

$$\underline{C}_{1p} = \underline{C}_{2p} = (\underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{1c} - \underline{Z}_{2c}) / \underline{Z}_{11}, \quad \underline{C}_{0p} = (\underline{Z}_{00} - \underline{Z}_{0c} - \underline{Z}_{0k}) / \underline{Z}_{00} - \text{коэффициенты токораспределения в схе-}$$

мах прямой и нулевой последовательностей;  $\Sigma Z^{(1)} = 2(\underline{Z}_{1c} + \underline{Z}_{1k})\underline{C}_{1p} + (\underline{Z}_{0c} + \underline{Z}_{0k})\underline{C}_{0p} + 3R_n$  — суммарное сопротивление комплексной схемы замещения однофазного КЗ;  $\underline{Z}^{(H)} = \underline{U}^{(H)}/\underline{I}^{(H)} = \underline{Z}_{11}/(1 - p) - \underline{Z}_{1c}$  — сопротивление на зажимах реле в нагруженном режиме;  $p = re^{j\delta} = \underline{E}_2/\underline{E}_1$  — отношение ЭДС эквивалентных систем по концам электропередачи.

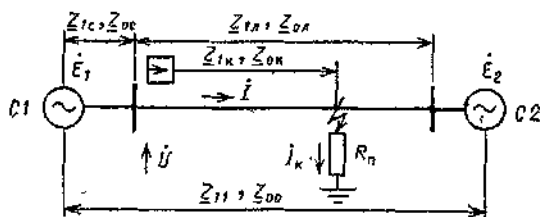


Рис. 5. Схема одиночной линии с двусторонним питанием

Токи всех последовательностей в месте установки реле при однофазном КЗ определяются выражениями приложения П1. Подстановка их приводит выражение (3) к виду

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_{1k} \left[ 1 + \frac{\underline{C}_{0p}(K - K_d)}{2\underline{C}_{1p} + (K_d + 1)\underline{C}_{0p} + \Sigma Z^{(1)}/(\underline{Z}^{(H)} - \underline{Z}_{1k})} \right],$$

или после некоторых преобразований:

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_{1k} \left[ 1 + \frac{K - K_d}{M} \left( 1 + \frac{(\underline{Z}_{1c} + \underline{Z}_{1k})N}{\underline{Z}_{11}/(1 - p) - \underline{Z}_{1c} - \underline{Z}_{1k}} \right)^{-1} \right], \quad (4)$$

где

$$M = 2\underline{C}_{1p}/\underline{C}_{0p} + K_d + 1; \quad N = \frac{1}{M} \left( \frac{2\underline{C}_{1p}}{\underline{C}_{0p}} + \frac{\underline{Z}_{0c} + \underline{Z}_{0k}}{\underline{Z}_{1c} + \underline{Z}_{1k}} \right).$$

Выражение (4) показывает, что сопротивление на зажимах реле связано с соотношением ЭДС  $p$  дробно-линейной зависимостью. Следовательно, при изменении соотношения между ЭДС только по значению ( $p = \text{const}$ ) или только по фазе ( $\delta = \text{const}$ ) диаграмма сопротивлений на зажимах реле поврежденной фазы представляет собой окружность. Положение центра и радиус окружности можно найти, пользуясь методами, изложенными в [4]. Не останавливаясь

на промежуточных выкладках, приведем окончательные результаты [3]:

а) диаграмма сопротивлений на зажимах реле [в плоскости  $\underline{U}_\phi / (\underline{I}_\phi + K_d \underline{I}_0)$ ] при изменении угла между ЭДС ( $p = \text{const}$ ).

Расстояние от начала координат до центра окружности:

$$O'O = \underline{Z}_{\text{ик}} \left[ 1 + \frac{\underline{K} - K_d}{\underline{M}(1 - \underline{N})} \left( 1 - \frac{\underline{N}}{(1 - \underline{N})\underline{C}_{\text{ip}} + \underline{N}} \cdot \frac{1}{1 - (pA)^2} \right) \right]. \quad (5)$$

Радиус окружности:

$$R = \left| \underline{Z}_{\text{ик}} \frac{\underline{K} - K_d}{\underline{M}} \frac{\underline{N}(1 - \underline{C}_{\text{ip}})}{[(1 - \underline{N})\underline{C}_{\text{ip}} + \underline{N}]^2} \frac{p}{1 - (pA)^2} \right|; \quad (6)$$

б) диаграмма сопротивлений на зажимах реле при изменении соотношения ЭДС по модулю ( $\delta = \text{const}$ ).

Расстояние от начала координат до центра окружности:

$$O'O = \underline{Z}_{\text{ик}} \left[ 1 + \frac{\underline{K} - K_d}{\underline{M}} \frac{1}{(1 - \underline{N})\underline{C}_{\text{ip}} + \underline{N}} \times \right. \\ \left. \times \left( \underline{C}_{\text{ip}} - \frac{\underline{N}}{1 - \underline{N}} \frac{e^{j(90^\circ + \alpha)}}{2 \sin \alpha} \right) \right]. \quad (7)$$

Радиус окружности:

$$R = \left| \frac{\underline{Z}_{\text{ик}}}{2 \sin \alpha} \frac{\underline{K} - K_d}{\underline{M}} \frac{\underline{N}}{[(1 - \underline{N})\underline{C}_{\text{ip}} + \underline{N}](1 - \underline{N})} \right|. \quad (8)$$

В приведенных формулах

$$\underline{A} = \frac{(1 - \underline{N})(1 - \underline{C}_{\text{ip}})}{(1 - \underline{N})\underline{C}_{\text{ip}} + \underline{N}}; \quad \alpha = \delta + \arg \underline{A}.$$

Приведенные соотношения позволяют оценить влияние несоответствия между расчетным и действительным коэффициентами компенсации на функционирование реле сопротивления.

В качестве примера рассмотрим схему на рис. 6, где реле сопротивления установлено на шинах А для защиты линии АВ. Точную фиксацию точки замыкания в конце линии могло бы обеспечить реле сопротивления с коэффициентом компенсации, определяемым по выражению (2) и равным  $\underline{K} = 2,21e^{j5,5^\circ}$ . На рис. 7 приведены области замеров реле сопротивления, полученные по выражениям (5) — (8) при однофазных КЗ в конце защищаемой линии.

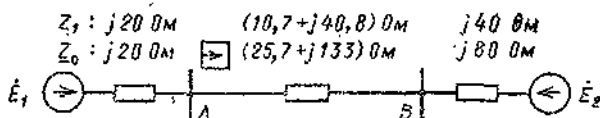
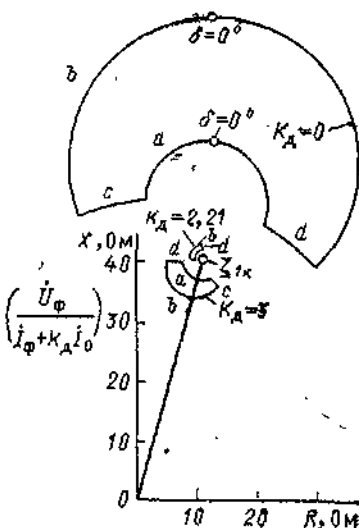


Рис. 6. Расчетная схема электропередачи

Рис. 7. Сопротивления на зажимах реле с различными коэффициентами компенсации при однофазных КЗ в конце линии по рис. 6

Указанные области рассчитаны и построены для трех случаев, когда значение коэффициента компенсации является вещественным:  $K_d=0$  (предельный случай — отсутствие компенсации по току  $I_0$ );  $K_d=|K|=2,21$ ;  $K_d=3$ . При расчетах принято, что отношение ЭДС ( $p$ ) может изменяться от 0,7 до 1,4 по значению и от  $+90^\circ$  до  $-90^\circ$  по углу. Сопротивления на зажимах каждого реле могут располагаться в области, ограниченной дугами  $p=0,7$ ,  $p=1,4$ ,  $\delta=90^\circ$  и  $\delta=-90^\circ$  (обозначены на рис. 7 как дуги  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  соответственно).

В рассматриваемых условиях сопротивление на зажимах реле, коэффициент компенсации которого равен  $2,21e^{j5,5^\circ}$ , было бы независимо от режима электрической системы и равно  $Z_{1к}$ . Сопротивления на зажимах реле, не имеющего компенсации по току нулевой последовательности ( $K_d=0$ ), располагаются в обширной области и при принятых пределах отношения между ЭДС завышены. Сопротивления на зажимах реле с увеличенным коэффициентом компенсации ( $K_d=3$ ) при принятых пределах углов между ЭДС занижены. Если не учитывается только комплексность коэффициента (реле с  $K_d=2,21$ ), то сопротивления на зажимах реле могут быть и завышены, и занижены (примерно на 5%) по отношению к  $Z_{1к}$ . Если на данной передаче возможно наложение на однофазное КЗ асинхронного режима (изменение  $\delta$  в пределах  $\pm 180^\circ$ ), то



сопротивление на зажимах реле будет изменяться по полным окружностям  $p = \text{const}$  и при  $K_d \neq K$  будет периодически меняться. При этом изменяются как значение, так и угол сопротивления на зажимах реле.

Если  $K_d \neq K$ , то сопротивление на зажимах реле отличается от  $Z_{1к}$  и при металлических КЗ двух фаз на землю. Диаграммы сопротивлений в этом случае можно построить по тем же формулам (5) — (8), но значения коэффициентов  $M$  и  $N$  следует брать из табл. 1. В табл. 1  $a = e^{j120^\circ}$ , другие обозначения пояснены в П1.

Таблица 1

Фаза	$\underline{M}$	$\underline{N}$
Опережающая поврежденная	$\frac{\underline{C}_{1р}}{\underline{C}_{ор}} \frac{(a - a^2)\underline{Z}_{орк} + a^2\underline{Z}_{1к}}{\underline{Z}_{1к}} + K_d + 1$	$-\frac{a^2}{\underline{M}} \left( \frac{\underline{C}_{1р}}{\underline{C}_{ор}} + 2 \frac{\underline{Z}_{орк} + \underline{Z}_{орк}}{\underline{Z}_{1к} + \underline{Z}_{1к}} \right)$
Отстающая поврежденная	$\frac{\underline{C}_{1р}}{\underline{C}_{ор}} \frac{(a - a^2)\underline{Z}_{орк} + a\underline{Z}_{1к}}{\underline{Z}_{1к}} + K_d + 1$	$-\frac{a}{\underline{M}} \left( \frac{\underline{C}_{1р}}{\underline{C}_{ор}} + 2 \frac{\underline{Z}_{орк} + \underline{Z}_{орк}}{\underline{Z}_{1к} + \underline{Z}_{1к}} \right)$

На основании формул (5) — (8) и табл. 1 на рис. 8 построены диаграммы сопротивлений на зажимах реле фаз В и С с  $K_d \neq K$  при КЗ вида ВС — земля в конце линии АВ (рис. 6). Замеры также имеют отклонения от  $Z_{1к}$ , но меньшие, чем при однофазном КЗ (рис. 7). Объясняется это тем, что при КЗ двух фаз на землю отношение токов  $I_0/I_\phi$  меньше, чем при однофазном КЗ.

Диаграммы сопротивлений на рис. 7 и 8 построены для конкретных параметров систем, поэтому из них не следует делать общих выводов. В схеме на рис. 6 система С2 маломощная, поэтому даже при замыкании в конце линии от системы С1 подтекает довольно значительный ток нулевой последовательности ( $\underline{C}_{ор} = 0,34$ ). При мощной системе С2 ток нулевой последовательности от С1 будет меньше и влияние коэффициента компенсации на замеры реле будет не столь велико.

Максимальное отклонение сопротивления на зажимах реле от  $Z_{1к}$ , как это следует из (6) и рис. 7, всегда имеет

место при наибольшем  $p$ . Поскольку при заданном значении  $p$  диаграмма сопротивлений на зажимах реле представляет собой окружность, то максимальное отклонение может быть определено как сумма расстояния от центра окружности  $p = \text{const}$  до конца вектора  $\underline{Z}_{1к}$  и радиуса окружности:

$$\Delta_{\max} = |O'O - \underline{Z}_{1к}| + R. \quad (9)$$

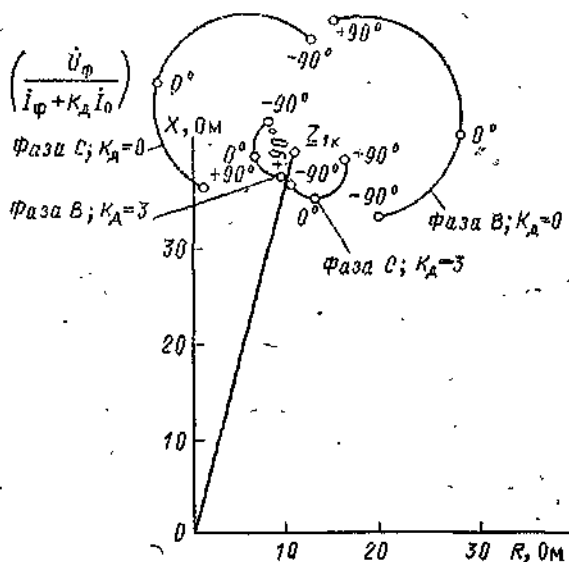


Рис. 8. Сопротивления на зажимах реле фаз В и С при металлических КЗ ВС — земля в конце линии по рис. 6 ( $p=1$ )

Наибольшее значение отклонение имеет при однофазном КЗ. При этом величины  $\underline{C}_{1р}$ ,  $\underline{C}_{0р}$ ,  $\underline{M}$  и  $\underline{N}$  имеют очень небольшие углы, т.е. их можно считать вещественными. Можно доказать, что при вещественных  $\underline{C}_{1р}$  и  $\underline{N}$  максимальное значение отклонения всегда имеет место при угле  $\delta$  между ЭДС, равном  $0^\circ$  или  $180^\circ$ , и равно

$$\Delta_{\max} = \frac{\underline{Z}_{1к}(K - K_A)}{\underline{M} \left[ 1 + \underline{N}(\underline{Z}_{1с} + \underline{Z}_{1к}) / \left( \frac{\underline{Z}_{11}}{1 + p} - \underline{Z}_{1с} - \underline{Z}_{1к} \right) \right]}, \quad (10)$$

где знак «—» соответствует  $\delta=0^\circ$ , а «+» —  $\delta=180^\circ$ .



В случае равенства ЭДС и по значению и по углу ( $p = 1, \delta = 0$ ) максимальное отклонение  $\Delta_{\max} = Z_{1k}(K - K_d)/M$ . Формулой (10) можно пользоваться для определения уставок реле, имеющих  $K_d \neq K$  и для взаимного согласования характеристик реле, коэффициенты компенсации которых не равны между собой.

На основании изложенного можно сформулировать признаки режима, при котором сопротивление на зажимах реле максимально отличается от  $Z_{1k}$ :

а) расчетный вид замыкания — КЗ одной фазы на землю;

б) расчетный режим по ЭДС — совпадение ЭДС систем по фазе при максимальном значении модуля отношения ЭДС  $p$ ;

в) расчетный режим первичной схемы должен соответствовать минимальному значению коэффициента  $M$ , что имеет место при минимуме отношения коэффициентов токораспределения  $C_{1p}/C_{op}$ .

Из приведенного рассмотрения видно, что следует стремиться иметь коэффициент компенсации по току нулевой последовательности близкий к расчетному по выражению (2). В противном случае необходимо расширять область плоскости сопротивлений, охватываемую характеристикой реле даже для обеспечения чувствительности к металлическим КЗ. Существенно затруднено и согласование между собой характеристик реле, если их коэффициенты компенсации не равны расчетным.

### 3. СОПРОТИВЛЕНИЕ НА ЗАЖИМАХ РЕЛЕ ПРИ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ КЗ НА ЛИНИЯХ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ И НА ЛИНИЯХ С ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИЕЙ

Наличие на линии ответвлений с трансформаторами, нейтраль которых заземлена, вносит свои особенности в построение схемы компенсации, предназначенной обеспечить точную фиксацию точки КЗ. Рассмотрим схему на рис. 9, имеющую одно ответвление с заземленной нейтралью. Током нагрузки трансформатора ответвления пренебрегаем, т. е. считаем, что наличие ответвления сказывается лишь на токах нулевой последовательности.

Если произошло однофазное замыкание на землю в точке  $N$ , то напряжение поврежденной фазы в точке  $M$  равно

$$\dot{U}_\phi = I_1 Z_{1MN} + I_2 Z_{2MN} + I_0 Z_{0MN} + I'_0 Z_{0LN}.$$

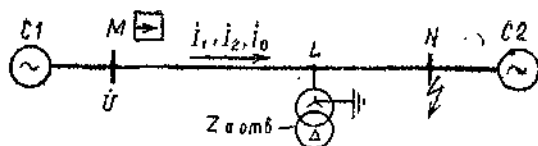


Рис. 9. Схема линии с ответвлением

Учитывая, что

$$\underline{Z}_0 = (\underline{K} + 1) \underline{Z}_1; \quad \dot{I}_0' = \dot{I}_0 \frac{\underline{Z}_{0\text{с}} + \underline{Z}_{0\text{МЛ}}}{\underline{Z}_{0\text{отв}}}; \quad \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0' = \dot{I}_\Phi,$$

получаем:

$$\dot{U}_\Phi = \left\{ \dot{I}_\Phi + \left[ \underline{K} + (\underline{K} + 1) \frac{\underline{Z}_{1\text{ЛН}}}{\underline{Z}_{1\text{МН}}} \cdot \frac{\underline{Z}_{0\text{с}} + \underline{Z}_{0\text{МЛ}}}{\underline{Z}_{0\text{отв}}} \right] \dot{I}_0' \right\} \underline{Z}_{1\text{МН}}.$$

Таким образом, замер, равный  $\underline{Z}_{1\text{МН}}$  и не зависящий от вида КЗ на землю и от соотношения ЭДС систем, обеспечит реле со следующим коэффициентом компенсации [6, стр. 218—230]:

$$\underline{K}' = \underline{K} + (\underline{K} + 1) \frac{\underline{Z}_{1\text{ЛН}}}{\underline{Z}_{1\text{МН}}} \cdot \frac{\underline{Z}_{0\text{с}} + \underline{Z}_{0\text{МЛ}}}{\underline{Z}_{0\text{отв}}}. \quad (11)$$

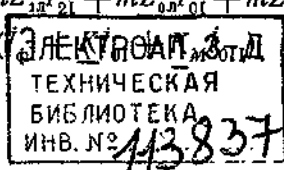
Так как в (11) входит отношение  $\underline{Z}_{1\text{ЛН}}/\underline{Z}_{1\text{МН}}$ , то коэффициент  $\underline{K}'$  зависит от места КЗ и увеличивается при удалении замыкания от точки  $L$ . Следовательно, принципиально возможно обеспечение точной фиксации сопротивления на зажимах реле при КЗ лишь в одной точке (например, точке конца зоны или конца линии). При КЗ в других точках линии (в том числе и на участке  $ML$ ) коэффициент компенсации реле не будет равным расчетному.

Следует отметить, что в случае отключения трансформатора ответвления или разземления его нейтрали такое реле будет иметь завышенный коэффициент компенсации при КЗ вдоль всей длины линии, что приведет к удлинению зоны действия (см. рис. 7, случай  $K_d=3$ ). Оценить опасность такого удлинения зоны можно по формуле (10).

Серьезные затруднения появляются и при использовании дистанционного принципа на линиях с взаимной индукцией в схеме нулевой последовательности, в частности на параллельных линиях (рис. 10).

Так, при КЗ в точке  $K$  напряжение в месте установки защиты  $\dot{U}$  равно [7]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_\Phi &= m\underline{Z}_{1\text{Л}} \dot{I}_{11} + m\underline{Z}_{1\text{Л}} \dot{I}_{21} + m\underline{Z}_{0\text{Л}} \dot{I}_{01} + m\underline{Z}_{\text{М}} \dot{I}_{01} = \\ &= m\underline{Z}_{1\text{Л}} (\dot{I}_{11} + \dot{I}_{21} + \dot{I}_{01}) + m\underline{Z}_{0\text{Л}} \dot{I}_{01} + m\underline{Z}_{\text{М}} \dot{I}_{01} = \end{aligned} \quad (12)$$



где  $K_M = \underline{Z}_M / \underline{Z}_{1\lambda}$  — коэффициент компенсации от тока нулевой последовательности, проходящего по параллельной линии.

Выражение (12) показывает, что точная фиксация места КЗ при наличии взаимной индукции возможна, если проводить компенсацию током фазы, током нулевой последовательности своей линии и током нулевой последовательности параллельной линии (по терминологии [7] — схема с компенсацией взаимной индукции). Технически несложно

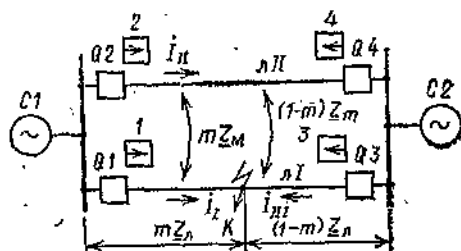


Рис. 10. Короткое замыкание на одной из параллельных линий

ввести в схему компенсации ток нулевой последовательности параллельной линии. Для этого достаточно у трансформатора в схеме рис. 2 сделать не две, а три первичные обмотки. Однако при выборе уставок защит с такой компенсацией встречаются значительные трудности [8, 9, 10], часто заставляющие отказаться от компенсации взаимной индукции. Укажем на основные режимы, учет которых затрудняет применение компенсации током параллельной линии в устройствах защиты.

а) Режим, когда параллельная линия отключена и заземлена с двух сторон. Поскольку заземляющие ножи обычно устанавливаются на линейных разъединителях, трансформаторы тока параллельной линии в рассматриваемом режиме оказываются вне контура циркуляции тока по этой линии. Поэтому в этом режиме схема с компенсацией взаимной индукции оказывается неэффективной.

б) Режим каскадного отключения КЗ на параллельной линии. Если точка К достаточно близка к шинам системы С1 (рис. 10) и замыкание отключено каскадно (только выключателем Q1), то у защиты 2 исчезает компенсация током параллельной линии. Защита 2 увеличивает свою зону, что затрудняет ее согласование с защитами, установленными у шин системы С2 и сохраняющими в указанном режиме правильную компенсацию взаимной индукции.

в) В режиме параллельной работы двух цепей компенсация взаимной индукции обеспечивает правильный замер

на поврежденной линии, но приводит к заниженному замеру на неповрежденной. Данное обстоятельство также неблагоприятно для взаимного согласования защит двух концов параллельных линий.

Указанные причины часто заставляют отказываться от использования в схеме компенсации тока нулевой последовательности параллельной линии. Произведем оценку влияния отсутствия компенсации взаимной индукции на замер реле при однофазных КЗ на параллельных линиях. Для этого воспользуемся тем, что ток нулевой последовательности параллельной линии может быть выражен через ток поврежденной линии во всех расчетных режимах [10]. Производится это следующим образом.

**Режим I.** Параллельная линия отключена и заземлена с двух сторон.

Для этого режима могут быть записаны следующие уравнения связи между токами  $I_{0I}$ ,  $I_{0II}$ ,  $I_{0III}$  схемы на рис. 10:

$$I_{0II} = \frac{K_M}{K+1} \left( \frac{1-m}{C_{op}} - 1 \right) I_{0I};$$

$$I_{0III} = [(1-C_{op})/C_{op}] I_{0I}.$$

Производя подстановку значения  $I_{0II}$  в (12), получаем:

$$\dot{U}_\Phi = \left\{ I_{\Phi I} + \left[ K - \frac{K_M^2}{K+1} \left( 1 - \frac{1-m}{C_{op}} \right) \right] I_{0I} \right\} m \underline{Z}_{1n}.$$

Отсюда следует, что в рассматриваемом режиме точный замер могло бы обеспечить реле с коэффициентом компенсации по току нулевой последовательности своей линии  $K^I$ , равным:

$$\underline{K}^I = \underline{K} - \frac{K_M^2}{K+1} \left( 1 - \frac{1-m}{C_{op}} \right). \quad (13)$$

**Режим II.** Параллельная линия отключена без заземления.

Защищаемая линия может рассматриваться как одиночная, поэтому точный замер обеспечивает реле с коэффициентом компенсации

$$\underline{K}^{II} = \underline{K}. \quad (14)$$

**Режим III.** В работе две параллельные линии.

Записав уравнения падения напряжения при обходе контура, образованного параллельными линиями, находим:

$$I_{0II} = m I_{0I} - (1-m) I_{0III} = \left( 1 - \frac{1-m}{C_{op}} \right) I_{0I}.$$

Подстановка данного соотношения в (12) позволяет сделать вывод, что точный замер обеспечило бы реле с коэффициентом компенсации

$$\underline{K}^{III} = \underline{K} + \underline{K}_M \left( 1 - \frac{1-m}{\underline{C}_{op}} \right). \quad (15)$$

Полученные выражения показывают, что в режимах I и III расчетный коэффициент компенсации зависит от расстояния до места КЗ, т. е. не может быть заранее установлен на реле. Но выражения (13) — (15) можно использовать для подстановки в (10), что позволит определить погрешность фиксации, вызываемую отсутствием компенсации взаимной индуктивности параллельных линий.

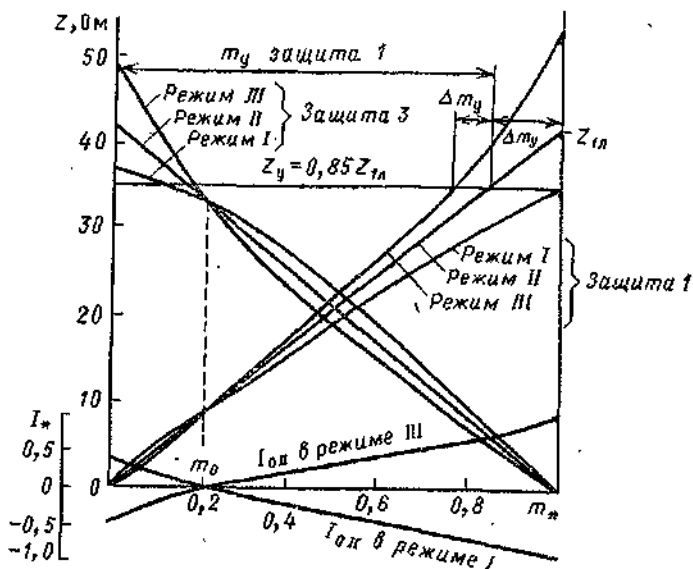


Рис. 11. Сопротивления на зажимах реле при однофазных КЗ на параллельных линиях рис. 10 (компенсация взаимной индуктивности отсутствует)

Для примера на рис. 11 показаны зависимости сопротивления на зажимах реле защит 1 и 3 схемы рис. 10 от параметра  $m$ , определяющего удаленность КЗ от защиты 1. Расчет проведен для двухцепной линии с конкретными параметрами:  $\underline{Z}_{1с1} = j20$  Ом,  $\underline{Z}_{ос} = j20$  Ом,  $\underline{Z}_{1л1} = \underline{Z}_{1лП} = j40,8$  Ом,  $\underline{Z}_{ол1} = \underline{Z}_{олП} = j133$  Ом,  $\underline{Z}_{ом} = j66,2$  Ом,  $\underline{Z}_{1с2} = j40$  Ом,  $\underline{Z}_{ос2} = j80$  Ом. Сопротивления на зажимах реле

определялись по (10) в предположении равенства ЭДС эквивалентных систем. Принято, что на реле установлен коэффициент компенсации  $K_d = K^{\text{II}} = 2,26$ , обеспечивающий точную фиксацию сопротивления до места КЗ в режиме II. Соответственно зависимости  $Z_{\text{IK}} = f(m)$  в режиме II имеют вид прямых. При КЗ в режимах I и III установленный на реле коэффициент  $K_d$  не равен расчетному значению  $K^{\text{I}}$  или  $K^{\text{III}}$ , что вызывает ошибку в замере сопротивления.

Защита I установлена вблизи шин более мощной системы. Ее реле в режиме I почти всегда имеет заниженное сопротивление на зажимах, а в режиме III — завышенное. Защита 3 установлена вблизи шин менее мощной системы. Ее реле при КЗ почти по всей длине линии имеет в режиме III заниженное сопротивление на зажимах, а в режиме I — завышенное. Но при приближении точки КЗ к шинам противоположной стороны положение меняется.

На том же рис. 11 нанесена прямая  $Z_y = 0,85Z_{\text{IK}}$ , точки пересечения которой с кривыми сопротивлений на зажимах позволяют определить зону действия защиты с заданной уставкой. Как видно из рисунка, защита I будет излишне срабатывать в режиме I, защита 3 почти не имеет отстройки от срабатывания при КЗ на шинах противоположного конца линии в том же режиме. В режиме III обе защиты уменьшают свою зону действия.

Для пояснения причины разного влияния взаимной индуктивности на поведение защит I и 3 на том же рис. 11 показано изменение величины тока нулевой последовательности в параллельной линии при перемещении точки КЗ вдоль защищаемой линии. И в режиме I, и в режиме III ток параллельной линии меняет знак при переходе КЗ через некоторую точку  $m_0$ . При КЗ в этой точке ток в параллельной линии отсутствует. Эта точка всегда расположена вблизи системы с меньшим сопротивлением в схеме нулевой последовательности.

При КЗ на шинах противоположного конца ток параллельной линии всегда направлен навстречу току защищаемой линии в режиме I и совпадает по направлению с током защищаемой линии в режиме III. Структура формул (13) и (15) при этом определяет уменьшенный замер в режиме I (так как  $K^{\text{I}} = K - K_M^2 / (K + 1) < K$ ) и увеличенный замер в режиме III (так как  $K^{\text{III}} = K + K_M > K$ ). Но при перемещении точки КЗ положение меняется при изменении направления тока в параллельной линии.

Точка  $m_0$  всегда расположена в пределах линии и может быть легко определена. При КЗ в этой точке ток ну-

левой последовательности параллельной линий равен нулю, а  $K^I = K^{II} = K^{III}$ . Приравняв  $K$  выражения для  $K^I$  и  $K^{III}$ , получаем

$$1 - (1 - m_0) / C_{op} = 0; \quad C_{op} = 1 - m_0.$$

Учитывая, что ток в параллельной линии отсутствует, определим  $C_{op}$  как для одиночной линии:

$$C_{op} = \frac{Z_{oc2} + (1 - m_0)Z_{ol}}{Z_{oc1} + Z_{oc2} + Z_{ol}} = 1 - m_0.$$

Решая уравнение относительно  $m_0$ , получаем

$$m_0 = Z_{oc1} / (Z_{oc1} + Z_{oc2}).$$

На основе этого выражения можно определить соотношение сопротивлений систем в схеме нулевой последовательности, при котором  $m_0 = 0,85$ :

$$\frac{Z_{oc1}}{Z_{oc2}} = \frac{m_0}{1 - m_0} = \frac{0,85}{0,15} = 5,65.$$

При подобном соотношении сопротивлений систем реле с коэффициентом компенсации, выбранным без учета взаимной индуктивности, обеспечивает четкую фиксацию конца зоны в точке, удаленной от защиты на 85% длины линии во всех трех рассмотренных режимах. Однако отстроенность от срабатывания при КЗ в конце линии в режиме I будет все равно недостаточной, что видно на примере защиты 3 на рис. 11.

Обычно  $\frac{Z_{oc1}}{Z_{oc2}} < 5,65$  и в режиме I зона защиты удлинена, а в режиме III — укорочена. Однако в случаях  $\frac{Z_{oc1}}{Z_{oc2}} > 5,65$  положение будет обратным.

В [8, 10] разработана методика выбора уставок и коэффициентов компенсации защит параллельных линий. Она сводится к некоторому укорочению длины защищаемой зоны для обеспечения несрабатывания защиты при КЗ на шинах противоположной стороны в режиме I.

#### 4. ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В МЕСТЕ КЗ НА ЗАМЕР РЕЛЕ

Известно [1, 9], что для одиночной линии (см. рис. 5) по заданному сопротивлению  $Z^{(n)}$  можно графически найти соотношение ЭДС эквивалентных систем. Подобное по-

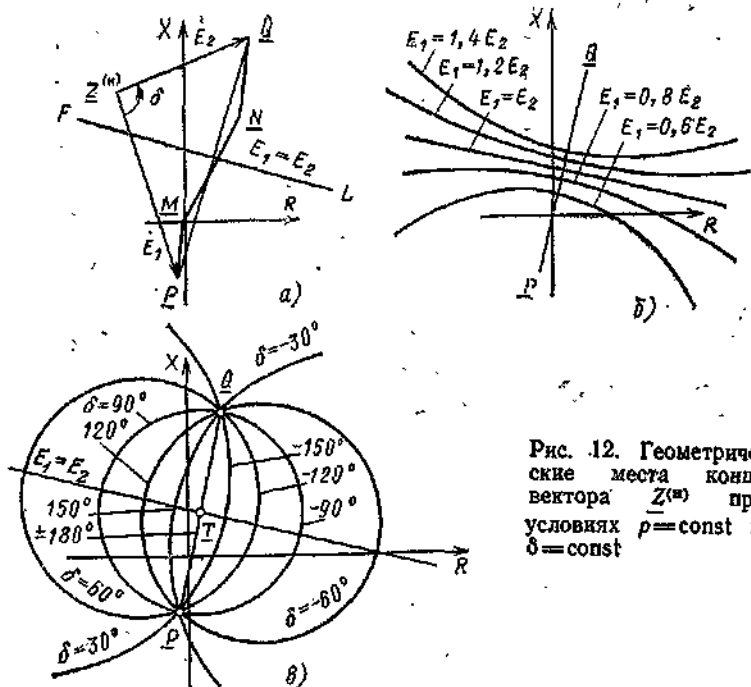


Рис. 12. Геометрические места конца вектора  $\underline{Z}^{(n)}$  при условиях  $p = \text{const}$  и  $\delta = \text{const}$

строение показано на рис. 12,а, где в комплексной плоскости построены все сопротивления прямой последовательности передачи: отрезок  $\underline{PM}$  равен сопротивлению системы «за спиной» реле —  $\underline{Z}_{1c}$ , отрезок  $\underline{NM}$  равен сопротивлению линии, отрезок  $\underline{QN}$  равен сопротивлению эквивалентной системы противоположной стороны  $\underline{Z}_{1c2}$ . Точки  $\underline{P}$  и  $\underline{Q}$  соответствуют местам приложения ЭДС эквивалентных систем. Если известно положение конца вектора сопротивления на зажимах реле в нагрузочном режиме  $\underline{Z}^{(n)}$ , то достаточно соединить эту точку с точками  $\underline{Q}$  и  $\underline{P}$ , чтобы получить два вектора  $\underline{PZ}^{(n)}$  и  $\underline{QZ}^{(n)}$ , которые в определенном масштабе соответствуют  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$ . Угол между векторами  $\underline{PZ}^{(n)}$  и  $\underline{QZ}^{(n)}$  равен углу  $\delta$  между ЭДС, отношение модулей ЭДС равно отношению длин отрезков

$$p = \frac{E_2}{E_1} = \frac{QZ^{(n)}}{PZ^{(n)}}$$

Можно графически решить и обратную задачу: по известному соотношению ЭДС найти сопротивление  $\underline{Z}^{(n)}$  или



найти геометрические места конца вектора  $\underline{Z}^{(n)}$  при изменении отношения ЭДС только по значению или только по углу.

Если  $E_1$  и  $E_2$  равны между собой по абсолютному значению, то конец вектора  $\underline{Z}^{(n)}$  при изменении угла между ЭДС может располагаться только на прямой  $FL$ , перпендикулярной  $\underline{PQ}$  и проходящей через ее середину (рис. 12,а). Для всех точек, лежащих выше прямой  $FL$ ,  $E_2 < E_1$ . Для всех точек, лежащих ниже прямой  $FL$ ,  $E_2 > E_1$ .

Геометрические места точек, соответствующих постоянному отношению абсолютных значений ЭДС, являются окружностями, дуги которых показаны на рис. 12,б. Геометрические места точек, соответствующих постоянному углу между ЭДС, являются дугами окружностей, проходящих через точки  $P$  и  $Q$ , как это показано на рис. 12,в. Все точки, лежащие справа от прямой  $PQ$ , соответствуют отрицательным углам между ЭДС ( $\delta < 0^\circ$ ). Все точки, лежащие слева от прямой  $PQ$ , соответствуют углам  $\delta > 0^\circ$ . Поскольку при отрицательных углах  $\delta$  активная мощность выдается из системы  $CI$ , ниже будут использоваться термины «передающий конец линии» ( $\delta < 0^\circ$ ) и «приемный конец линии» ( $\delta > 0^\circ$ ). Формулы для определения параметров окружностей  $\rho = \text{const}$ , и  $\delta = \text{const}$  даны в приложении ПЗ.

Взаимным наложением рис. 12,б и 12,в можно получить круговые диаграммы, определяющие соотношение между ЭДС для любого сопротивления нагрузочного режима. С учетом изложенного оценим влияние переходного сопротивления на замер реле.

При КЗ между фазами переходное сопротивление обусловлено электрической дугой и обычно не достигает большого значения. При анализе защиты от междуфазных КЗ максимальное значение переходного сопротивления принимается примерно 5 Ом. Иногда учитывают нелинейный характер этого сопротивления, вытекающий из свойств дуги.

При КЗ одной фазы на землю на промежуточной опоре линии переходное сопротивление складывается из сопротивления дуги, перекрывающей гирлянду изоляторов, сопротивления опоры и сопротивления заземляющего контура опоры. При падении провода значение сопротивления еще менее определено и может быть весьма большим, если провод упал на снег, лед или скальный грунт.

Определяющим при КЗ на опоре является сопротивление заземляющего контура опоры. Его предельная величина определена ПУЭ и может колебаться от 10 до 30 Ом в зависимости от значения удельного эквивалентного со-

противления земли. Характер этого сопротивления при промышленной частоте активный.

Наличие грозозащитных тросов может существенно уменьшить значение переходного сопротивления из-за растекания тока по заземляющим контурам нескольких опор. Однако на линиях 220 кВ и выше обычно выполняется изоляция тросов от промежуточных опор.

Учитывая уменьшение сопротивления заземляющего контура с увеличением габаритов опор, ниже при исследовании условий функционирования защиты принимается, что на линиях 500 кВ переходное сопротивление может достигать 15 Ом, на линиях 110—220 кВ — 30 Ом. Приведенные цифры несколько завышены. Так, в [16] указывается, что для линий 110 кВ с многократно заземленными тросами переходное сопротивление в подавляющем большинстве случаев не превосходит 3—5 Ом; для линий 500 кВ вероятность того, что  $R_n \leq 8$  Ом, равна 0,995. В литературе встречаются утверждения, что сопротивление заземляющего контура опоры сильно зависит от тока и имеет много меньшее значение при КЗ, чем при испытательных замерах на малых токах. Объясняется это электрофизическими процессами в почве.

При КЗ одной фазы через переходное сопротивление  $R_n$  по этому сопротивлению проходит ток  $3I_{0к}$ . Напряжение поврежденной фазы в месте установки реле равно сумме напряжения на переходном сопротивлении  $3R_n I_{0к}$  и падения напряжения вдоль линии  $\underline{Z}_{1к}(I_\phi + K I_0)$ . Поэтому сопротивление на зажимах реле поврежденной фазы равно

$$\underline{Z} = \frac{(I_\phi + K I_0) \underline{Z}_{1к} + 3R_n I_{0к}}{I_\phi + K I_0} = \underline{Z}_{1к} + \frac{3R_n I_{0к}}{I_\phi + K I_0}. \quad (16)$$

Или с учетом соотношений приложения П1:

$$\underline{Z}_* = \underline{Z}_{1к} + \Delta \underline{Z} = \underline{Z}_{1к} + \frac{3R_n}{2\underline{C}_{1р} + (K+1)\underline{C}_{ор} + \frac{\Sigma \underline{Z}^{(1)}}{\underline{Z}^{(n)} - \underline{Z}_{1к}}}, \quad (17)$$

т. е. наличие в месте КЗ переходного сопротивления приводит к появлению отклонения  $\underline{Z}$  от  $\underline{Z}_{1к}$  на комплексную величину  $\Delta \underline{Z}$ . Направление и абсолютное значение вектора  $\Delta \underline{Z}$  сильно зависит от величины составляющих токов нагрузочного режима (слагаемое знаменателя  $\Sigma \underline{Z}^{(1)} / (\underline{Z}^{(n)} - \underline{Z}_{1к})$ ). При отсутствии токов нагрузочного режима

$(Z^{(n)} = \infty)$  вектор  $\Delta Z$  равен

$$\Delta Z = \frac{3R_n}{2C_{1p} + (K+1)C_{op}} = \frac{3R_n}{C}, \quad (18)$$

где

$$C = 2C_{1p} + (K+1)C_{op}. \quad (18a)$$

В общем случае величина  $C$  является комплексной, т. е. вектор  $\Delta Z$  даже при  $Z^{(n)} = \infty$  может не совпадать по направлению с осью  $R$  комплексной плоскости.

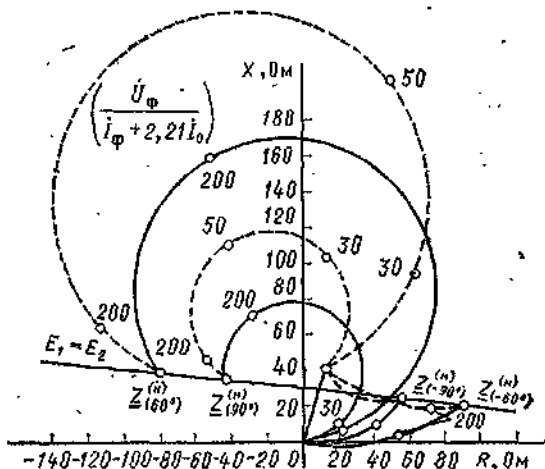


Рис. 13. Диаграммы сопротивлений на зажимах реле при КЗ через переходное сопротивление в начале и конце линии рис. 6:

— замыкания в начале линии; - - - - - замыкания в конце линии

Влияние переходного сопротивления на замер реле неоднократно исследовалось рядом авторов, среди которых следует отметить в первую очередь работы П. К. Фейста [13]. В частности, известно, что при однофазном КЗ с ростом  $R_n$  от нуля до бесконечности конец вектора  $Z$  перемещается по дуге окружности из точки  $Z_{1к}$  в точку  $Z^{(n)}$ .

На рис. 13 показано изменение сопротивления на зажимах реле при однофазных КЗ через сопротивление  $R_n$  в точках начала и конца линии (см. рис. 6). Рассмотрены КЗ при углах между ЭДС систем  $-60^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $+60^\circ$  и  $+90^\circ$ . С ростом переходного сопротивления сопротивление на зажимах реле всегда стремится по дуге окружности к  $Z^{(n)}$ . Для оценки скорости этого стремления на рисунке отмечены точки, соответствующие некоторым значе-

ниям  $R_n$ : 30, 50 и 200 Ом. При  $\delta > 0^\circ$  сопротивления на зажимах реле с ростом  $R_n$  переходят из 1-го во 2-й квадрант плоскости и могут быть сильно завышены по сравнению с сопротивлением при металлическом КЗ. При  $\delta < 0^\circ$  сопротивления на зажимах реле остаются в 1-м квадранте плоскости и изменяются не в столь большом диапазоне. Поэтому чувствительность к переходным сопротивлениям у защит, установленных на передающем конце линии, всегда много больше, чем у защит приемного конца.

Из характеристик рис. 13 можно делать общие выводы о тенденциях, но не о скорости изменения сопротивления на зажимах реле с ростом значения  $R_n$ . Тот факт, что при переходных сопротивлениях 30, 50 и даже 200 Ом сопротивление на зажимах реле еще не достигает  $Z^{(n)}$ , характерен только для конкретной рассматриваемой схемы передачи с довольно маломощной системой С2. При большой мощности С2 (малом сопротивлении) изменение  $Z$  с ростом  $R_n$  может идти быстрее. Это объясняется структурой формулы (17).

Действительно, при заданном  $Z^{(n)}$  изменение  $\Delta Z$  с ростом  $R_n$  происходит и по значению, и по фазе. Закономерность изменения значения проследить довольно сложно, но изменение фазы вызывается единственным фактором — изменением  $\Sigma Z^{(1)}$ , которое является суммарным сопротивлением комплексной схемы замещения однофазного КЗ и равно  $\Sigma Z^{(1)} = 2Z_{1\text{эк}} + Z_{0\text{эк}} + 3R_n(Z_{1\text{эк}} \text{ и } Z_{0\text{эк}})$  — собственные сопротивления схем прямой и нулевой последовательностей относительно точки КЗ). Поэтому изменение фазы и значения  $\Delta Z$  практически прекращается при  $3R_n \gg 2Z_{1\text{эк}} + Z_{0\text{эк}}$ , а скорость изменения  $\Delta Z$  примерно определяется отношением  $3R_n / (2Z_{1\text{эк}} + Z_{0\text{эк}})$ .

Для качественной оценки влияния  $R_n$  В. А. Шабановым разработан довольно простой способ графического построения диаграмм сопротивлений на зажимах реле. Согласно этому способу построение ведется следующим образом (рис. 14).

На комплексной плоскости строится линия сопротивлений нагрузочного режима (на рис. 14 — прямая  $E_1 = E_2$ ) и находятся точки  $Z_{1\text{к}}$  и  $-Z_{1\text{к}}$   $C'/C$ , где

$$C' = 2C_{2\text{р}} + \frac{Z_{0\text{с}}}{Z_{1\text{с}}} C_{0\text{р}}, \quad (19)$$

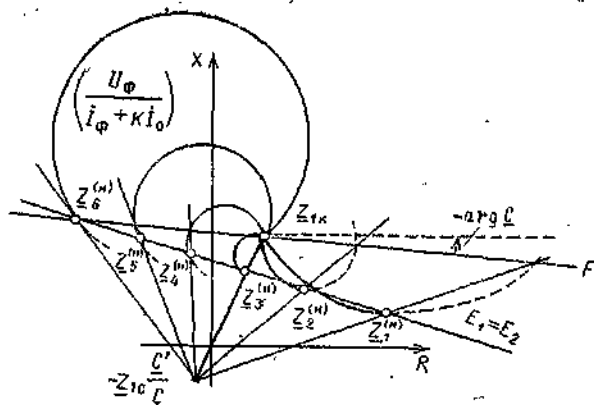


Рис. 14. Пример построения диаграмм сопротивления на зажимах реле при изменении  $R_n$  от 0 до  $\infty$  и различных значениях сопротивления нагрузочного режима

а параметр  $\underline{C}$  определяется по (18а). Затем через точку  $\underline{Z}_{1K}$  проводится прямая  $\underline{Z}_{1K}F$  под углом  $-\arg \underline{C}$  к горизонтальной. Для любого  $\underline{Z}^{(n)}$  окружность диаграммы сопротивлений проходит через три точки:  $\underline{Z}_{1K}$ ,  $\underline{Z}^{(n)}$  и точку пересечения прямой  $\underline{Z}_{1K}F$  с прямой, соединяющей точки  $-\underline{Z}_{1C}$   $\underline{C}'/\underline{C}$  и  $\underline{Z}^{(n)}$ . На рис. 14 показано применение рассмотренного способа для построения диаграмм сопротивлений на зажимах реле при КЗ в точке  $\underline{Z}_{1K}$  для шести различных нагрузочных режимов. Графическое построение весьма не сложно, но не позволяет оценить переходные сопротивления (хотя в принципе возможно построение на том же чертеже окружностей  $R_n = \text{const}$ ).

Рассмотрим более подробно влияние относительно небольших по значению переходных сопротивлений. Диаграммы сопротивлений на зажимах реле, установленного на передаче (см. рис. 6), при КЗ через  $R_n = 10, 20$  и  $30$  Ом в промежуточных точках линии приведены на рис. 15,а ( $\rho = 1, \delta = 0^\circ$ ) и рис. 15,б ( $\rho = 1, \delta = \pm 60^\circ$ ). Особо остановимся на случае  $\delta = 0^\circ$ , когда согласно выражению (18) наклон  $\Delta \underline{Z}$  к горизонтальной оси обуславливается только комплексностью коэффициентов токораспределения в схемах последовательностей  $\underline{C}_{1p}$  и  $\underline{C}_{0p}$ .

В общем случае коэффициенты токораспределения являются комплексными величинами. Комплексность  $\underline{C}_{0p}$  просто объяснить для схемы на рис. 5: сопротивления эк-

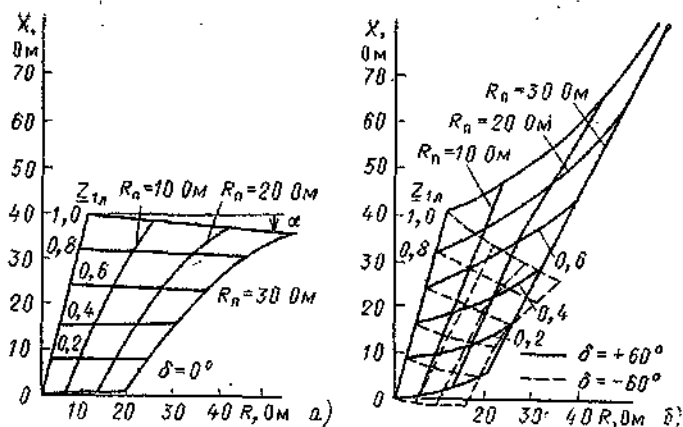


Рис. 15. Сопротивления на зажимах реле, установленных на линии рис. 6, при однофазных КЗ в промежуточных точках линии через  $R_n = 0, 10, 20$  и  $30$  Ом

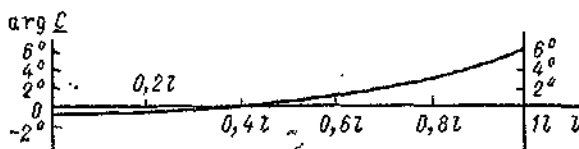


Рис. 16. Зависимость  $\arg C$  от расстояния до точки КЗ на линии рис. 6

вивалентных систем в схеме нулевой последовательности являются практически индуктивными (определяются в основном сопротивлениями трансформаторов с заземленными нейтралью); сопротивление линии всегда имеет значительную активную составляющую (в основном за счет сопротивления земли). Это приводит к комплексности величины  $\underline{C}_{ор}$ , т. е. к несовпадению по фазе тока нулевой последовательности в месте установки реле с током той же последовательности в месте КЗ. Аналогичное имеет место и для схем прямой и обратной последовательностей. Комплексность коэффициентов токораспределения приводит к комплексности величины  $\underline{C}$ , определяемой по (18а). Зависимость угла величины  $\underline{C}$  от расстояния до места повреждения для передачи с параметрами по рис. 6 приведена на рис. 16. Видно, что значение угла невелико (от  $-1^\circ$  до  $+6^\circ$ ), оно непрерывно изменяется при перемещении точки КЗ вдоль линии.

При однофазных КЗ через  $R_n$ , увеличивающееся от 0 до  $\infty$ , и равенстве ЭДС систем ( $Z^{(n)} = \infty$ ) сопротивление на зажимах реле устремляется в бесконечность по прямой, имеющим наклон к оси активных сопротивлений под углом  $\alpha = -\arg C$ , как это показано на рис. 15,а. Поэтому при КЗ через  $R_n$  в начале линии реактивная составляющая сопротивления на зажимах реле несколько увеличена, при КЗ в конце линии — уменьшена. При бесконечном росте  $R_n$  прямые, соответствующие КЗ в начале и в конце линии, должны пересекаться (на рисунке не показано).

Комплексность токораспределения в схемах последовательностей (наличие угла  $\alpha$ ) отрицательно сказывается на функционировании многих устройств релейной защиты и определения места повреждения, так как лишает устройства точной информации о фазе тока в месте повреждения. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен в гл. 3 и 4.

При КЗ двух фаз на землю в общем случае может быть три переходных сопротивления — два фазных и одно общее. При изменении одного из переходных сопротивле-

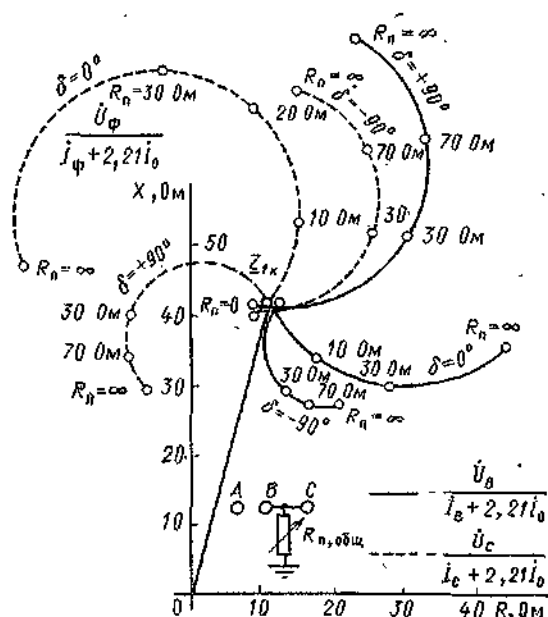


Рис. 17. Диаграммы сопротивлений на зажимах реле фаз В и С при замыканиях ВС — земля на линии рис. 6 ( $p=1$ ;  $\delta = -90^\circ, 0^\circ$  и  $+90^\circ$ )

ний от 0 до  $\infty$  диаграммы сопротивлений на зажимах реле имеют вид окружностей [13]. При отсутствии фазных переходных сопротивлений и изменении общего от 0 до  $\infty$  конец вектора  $\underline{Z}$  переходит по дуге от точки  $\underline{Z}_{1к}$  к точке сопротивления на зажимах реле при двухфазном КЗ без земли. Такие диаграммы для случаев КЗ в конце линии (см. рис. 6) приведены на рис. 17. Изображены окружности, по которым скользят концы векторов  $\underline{U}_B/(I_B + KI_0)$  и  $\underline{U}_C/(I_C + KI_0)$  при замыкании фаз В и С на землю, когда  $K=2,21$ . Величины ЭДС эквивалентных систем приняты равными по абсолютному значению, но рассмотрены различные режимы по углу  $\delta$  между ЭДС:  $\delta=0^\circ$ ,  $\delta=90^\circ$ ,  $\delta=-90^\circ$ . При металлическом КЗ сопротивления на зажимах реле близки к  $\underline{Z}_{1к}$  (небольшое расхождение имеется из-за неточного равенства расчетного и действительного коэффициентов компенсации по току нулевой последовательности). С ростом общего переходного сопротивления концы векторов  $\underline{Z}$  скользят по дугам, причем сопротивления на зажимах реле двух поврежденных фаз не равны между собой. Каждое из реле может иметь и завышенный, и заниженный замер.

В общем случае (при изменении и общего, и фазных переходных сопротивлений) диаграммы перестают быть дугами окружностей, и графическое построение их нецелесообразно из-за сложности.

#### 5. СОПРОТИВЛЕНИЕ НА ЗАЖИМАХ РЕЛЕ ПРИ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ КЗ НА НЕТРАНСПОНИРОВАННОЙ ЛИНИИ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Отсутствие или неполный цикл транспозиции на линии сказываются на точности замера сопротивления до места КЗ. В сущности, при любом КЗ в промежуточной точке линии имеется определенная пофазная несимметрия параметров, так как на полной длине линии обычно выполняется только один полный цикл транспозиции. Оценка погрешности от отсутствия транспозиции возможна либо путем расчетов на ЭВМ с использованием фазных составляющих [14, 15], либо аналитическим путем [3].

Для аналитической оценки погрешности замера на нетранспонированной линии будем рассматривать линию как систему трех однофазных петель провод — земля. В общем случае все собственные и взаимные сопротивления петель можно разложить на системы сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей на основе общих



положений метода симметричных составляющих:

$$\begin{pmatrix} \underline{Z}_{0AA} \\ \underline{Z}_{1AA} \\ \underline{Z}_{2AA} \end{pmatrix} = \frac{A}{3} \begin{pmatrix} \underline{Z}_{AA} \\ \underline{Z}_{BB} \\ \underline{Z}_{CC} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} \underline{Z}_{0AB} \\ \underline{Z}_{1AB} \\ \underline{Z}_{2AB} \end{pmatrix} = -\frac{A}{3} \begin{pmatrix} \underline{Z}_{AB} \\ \underline{Z}_{BC} \\ \underline{Z}_{CA} \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix}.$$

(при разложении за основную принималась фаза  $A$ ).

Если фаза  $A$  в конце линии замкнулась на землю, то ее напряжение в начале линии можно записать двумя способами:

с использованием фазных составляющих сопротивлений и токов:

$$\dot{U}_A = I_A \underline{Z}_{AA} + I_B \underline{Z}_{AB} + I_C \underline{Z}_{AC}; \quad (20)$$

с использованием симметричных составляющих сопротивлений и токов [3]:

$$\dot{U}_A = \underline{Z}_A (I_A + K_A I_0); \quad (21)$$

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_{AA} - \underline{Z}_{0AB} + 2a^2 \underline{Z}_{1AB} - a \underline{Z}_{2AB}; \quad (22)$$

$$K_A = \frac{3}{\underline{Z}_A} \left[ \underline{Z}_{0AB} - a^2 \underline{Z}_{1AB} + \frac{I_{2A}}{I_0} (a \underline{Z}_{2AB} - a^2 \underline{Z}_{1AB}) \right]. \quad (23)$$

Выражения (22) и (23) записаны для фазы  $A$ . Для фаз  $B$  и  $C$  в индексах сопротивлений следует произвести круговую перестановку.

Выражения (22) и (23) позволяют оценить функционирование реле с компенсацией током фазы и током нулевой последовательности на нетранспонированной линии. В (23) входит отношение  $I_{2A}/I_0$ , которое зависит от места КЗ, т. е. теоретически можно обеспечить однозначный (фиксированный) замер сопротивления только при КЗ в одной заранее выбранной точке линии. Для этого необходимо иметь различные коэффициенты компенсации по току нулевой последовательности для реле каждой фазы, определяемые по (23). Сопротивления на зажимах реле при КЗ на разных фазах не равны между собой и определяются по (22).

В реальных условиях реле трех фаз имеют одинаковые коэффициенты компенсации. Поэтому все реле должны иметь погрешности замера, зависящие от режима системы. Эти погрешности могут быть определены методами, изложенными в § 2, в частности по выражению (3).

Строго говоря, соотношения между током фазы, током нулевой последовательности и током обратной последовательности, входящие в выражения (3) и (23), необходимо определять с учетом несимметрии параметров линии, что значительно усложняет расчет. Однако для упрощения при определении соотношений между токами можно пренебречь влиянием пофазной несимметрии и представить линию средними симметричными параметрами. Тогда для построения диаграмм сопро-

тивлений на зажимах реле можно пользоваться формулами (4)–(8) и формулами приложения П1.

Для примера на рис. 18 показаны сопротивления на зажимах реле фаз *A*, *B* и *C* при однофазных КЗ в конце линии (см. рис. 6) в предположении отсутствия на ней транспозиции. Считалось, что расположение проводов горизонтальное, фаза *B* расположена в середине, расстояние между проводами 6 м. Собственные и взаимные сопротивления петлей провод–земля равны  $\underline{Z}_{AA} = \underline{Z}_{BB} = \underline{Z}_{CC} = (15,7 + j71,6) \text{ Ом}$ ,  $\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = (5 + j32,2) \text{ Ом}$ ,  $\underline{Z}_{CA} = (5 + j27,8) \text{ Ом}$ . Расчетные по (22) сопротивления равны  $\underline{Z}_A = (13,2 + j41,6) \text{ Ом}$ ,  $\underline{Z}_B = (10,7 + j39,4) \text{ Ом}$ ,  $\underline{Z} = (6,5 + j41,6) \text{ Ом}$  и показаны на рис. 18. Такие замеры имели бы реле с коэффициентами компенсации, найденными по (23):

$$\underline{K}_A = 2,12e^{j13^\circ}, \quad \underline{K}_B = 2,38e^{j6^\circ 20'}, \quad \underline{K}_C = 2,23e^{-j18^\circ}.$$

Рис. 18. Сопротивления на зажимах реле трех фаз при однофазных КЗ в конце линии рис. 6 в случае отсутствия транспозиции на линии:

1 — реле фазы *A*; 2 — реле фазы *B*; 3 — реле фазы *C*

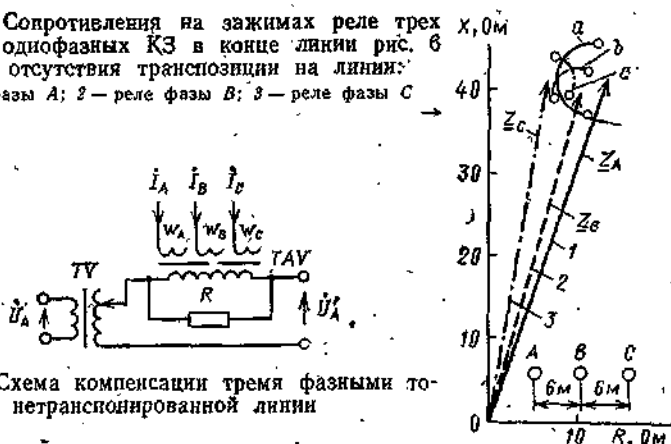


Рис. 19. Схема компенсации тремя фазными токами для нетранспонированной линии

Если реальные реле имеют коэффициент компенсации  $K_d = 2,91$ , то сопротивления на их зажимах зависят от режима системы и показаны на рис. 18 дугами *a*, *b*, *c*. При построении диаграмм приняты следующие пределы отношения ЭДС:  $p = 1,4$ ,  $\delta = -90^\circ \dots +90^\circ$ . Соответственно сопротивление на зажимах каждого реле может располагаться на дуге окружности  $p = 1,4$ . Из рисунка видно, что максимальное отклонение сопротивления от расчетного имеется у реле фазы *A* (в данном случае до 14%).

Известна схема компенсации (рис. 19), обеспечивающая более точную работу реле на нетранспонированной линии [7, 15]. Компенсация производится тремя фазными токами. Для фазы *A* компенсированное напряжение равно

$$\underline{U}'_A = \underline{U}_A - (I_A w_A + I_B w_B + I_C w_C) \underline{Z}_A$$

где  $w_A, w_B, w_C$  — числа витков первичных обмоток трансреактора, обтекаемых токами соответствующих фаз;  $Z$  — коэффициент трансформации трансреактора.

Сравнивая приведенное выражение с выражением (20), заключаем, что компенсация обеспечивается, если:

$$w_A/w_B/w_C = Z_{AA}/Z_{AB}/Z_{AC}.$$

Поскольку  $Z_{AA}, Z_{AB}, Z_{AC}$  — комплексные величины, то для абсолютно точной компенсации следовало бы заменить трансреактор, в схеме рис. 19 на три отдельных трансреактора с шунтирующими резисторами разного сопротивления.

На транспонированной линии схема рис. 19 абсолютно эквивалентна схеме рис. 2, если принять  $w_B = w_C$  и обеспечить определенное соотношение между витками. Это видно из преобразования:

$$I_A w_A + I_B w_B + I_C w_C = (w_A - w_B) \left( I_A + \frac{3w_B}{w_A - w_B} I_a \right).$$

В схеме рис. 4 также можно обеспечить более точную работу при КЗ на нетранспонированной линии, если принять сопротивления резисторов  $R1-R3$  пропорциональными собственным и взаимным сопротивлениям проводов линии.

## 6. СОПРОТИВЛЕНИЕ НА ЗАЖИМАХ РЕЛЕ ПРИ КЗ НА ЛИНИИ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

При установке реле на линии большой протяженности необходимо считаться с влиянием распределенных поперечных параметров линии (емкостной проводимости). Наличие емкостной проводимости приводит к тому, что значение и фаза тока непрерывно изменяются вдоль линии и ток в месте установки реле не несет полной информации о значении тока в удаленных точках линии.

Возможность построения схемы компенсации для транспонированной линии большой протяженности впервые показана Г. И. Атабековым, который предложил включать реле на напряжение фазы и сочетание тока фазы с током и напряжением нулевой последовательности.

Обоснование такого включения следующее. Участок линии между местом установки реле и точкой конца зоны действия в схеме  $n$ -й последовательности замещается четырёхполюсником с параметрами  $A_n, B_n, C_n, D_n$ , как это показано на рис. 81,6 приложения III. Для такого четы-

Реклюсюсника известны соотношения между токами и напряжениями на входе ( $\dot{U}_n, I_n$ ) и выходе ( $\dot{U}'_n, I'_n$ ):

$$\left\| \begin{array}{c} \dot{U}_n \\ I_n \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cc} \underline{A}_n & \underline{B}_n \\ \underline{C}_n & \underline{D}_n \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} \dot{U}'_n \\ I'_n \end{array} \right\|; \quad \left\| \begin{array}{c} \dot{U}'_n \\ I'_n \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cc} \underline{D}_n & -\underline{B}_n \\ -\underline{C}_n & \underline{A}_n \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} \dot{U}_n \\ I_n \end{array} \right\|.$$

Приведенные выражения позволяют определить напряжение фазы в точке конца зоны действия через токи и напряжения в месте установки реле:

$$\dot{U}'_\phi = \dot{U}'_1 + \dot{U}'_2 + \dot{U}'_0 = \underline{D}_1 \dot{U}_\phi - \underline{B}_1 I_\phi + \\ + \underline{D}_2 \dot{U}_{2\phi} - \underline{B}_2 I_{2\phi} + \underline{D}_0 \dot{U}_0 - \underline{B}_0 I_0.$$

Учитывая, что  $\underline{D}_1 = \underline{D}_2$ ,  $\underline{B}_1 = \underline{B}_2$ , получим

$$\dot{U}'_\phi = \underline{D}_1 \dot{U}_\phi + (\underline{D}_0 - \underline{D}_1) \dot{U}_0 - \underline{B}_1 I_\phi - (\underline{B}_0 - \underline{B}_1) I_0. \quad (24)$$

При металлическом КЗ данной фазы на землю в точке конца зоны  $\dot{U}'_\phi = 0$ , а напряжение фазы в месте установки реле равно

$$\dot{U}_\phi = \frac{\underline{B}_1}{\underline{D}_1} \left( I_\phi + \frac{\underline{B}_0 - \underline{B}_1}{\underline{B}_1} I_0 \right) - \frac{\underline{D}_0 - \underline{D}_1}{\underline{D}_1} \dot{U}_0. \quad (25)$$

Введем понятие эквивалентного тока:

$$I_{\text{эк}} = I_\phi + \frac{\underline{B}_0 - \underline{B}_1}{\underline{B}_1} I_0 + \frac{\underline{D}_1 - \underline{D}_0}{\underline{B}_1} \dot{U}_0. \quad (26)$$

Тогда сопротивление на зажимах реле при металлическом КЗ, найденное в плоскости  $\dot{U}_\phi / I_{\text{эк}}$ , фиксировано и равно

$$\underline{Z} = \underline{B}_1 / \underline{D}_1. \quad (27)$$

Оно определяется только параметрами линии и не зависит от режима работы систем и от вида КЗ на землю. Реле целесообразно включать на эквивалентный ток, выполняя компенсацию от тока фазы, тока нулевой последовательности с коэффициентом

$$\underline{K}_I = (\underline{B}_0 - \underline{B}_1) / \underline{B}_1 \quad (28)$$

и от напряжения нулевой последовательности с коэффициентом

$$\underline{K}_U = (\underline{D}_1 - \underline{D}_0) / \underline{B}_1. \quad (29)$$

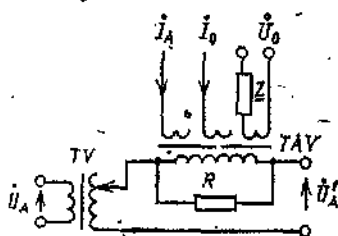


Рис. 20. Схема компенсации для линии большой протяженности

Целесообразно осуществлять ввод компенсации от  $U_0$  по тем же цепям, по которым вводится компенсация от токов. Для этого возможно применение схемы, приведенной на рис. 20, в которой компенсация от двух токов и от напряжения  $U_0$  вводится через один трансреактор. Необходимое значение и фаза тока в обмотке трансреактора создаются подбором сопротивления  $Z$ .

При известном и стабильном сопротивлении нулевой последовательности прилегающей системы в принципе можно обойтись без компенсации по напряжению нулевой последовательности. Действительно, учитывая, что  $U_0 = -I_0 Z_{oc1}$ , выражение (26) можно переписать в виде:

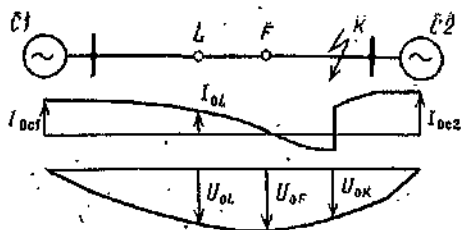
$$I_{\text{эк}} = I_{\phi} + \left( \frac{B_0 - B_1}{B_1} - \frac{D_1 - D_0}{B_1} Z_{oc1} \right) I_0.$$

Поэтому для точной фиксации сопротивления на зажимах реле достаточно иметь на длинной линии компенсацию от тока фазы и тока нулевой последовательности с коэффициентом:

$$K = \frac{B_0 - B_1}{B_1} - \frac{D_1 - D_0}{B_1} Z_{oc1}. \quad (30)$$

Физический смысл компенсации от тока и напряжения нулевой последовательности поясняется рис. 21. На нем показано распределение тока и напряжения нулевой последовательности при КЗ на землю в промежуточной точке  $K$  передачи. Из-за влияния поперечной емкости распределение носит волновой характер. Принято, что точка  $F$  удалена от нейтрали системы  $CI$  на четверть волны тока нулевой последовательности. На участке между точками  $F$  и  $k$  падение напряжения в схеме нулевой последовательности обусловлено емкостными токами участка  $FK$ . Между тем, если реле установлено в точке  $F$ , ток нулевой последовательности в нем не проходит и падение напряжения на участке  $FK$  в схеме реле не компенсируется. Если реле установлено в точке  $L$ , компенсация от тока в схеме реле будет производиться так, как если бы по всему участку  $LK$  проходил ток  $I_{0L}$ , что совершенно не соответствует действительности. Правильную компенсацию обеспечит лишь использование и тока и напряжения нулевой последовательности, поскольку вместе они дают информацию о падении напряжения на защищаемом участке и от полного и от емкостного тока.

Рис. 21. Распределение тока и напряжения нулевой последовательности при КЗ на линии большой протяженности



Важной особенностью выражений (27) — (29) является зависимость всех входящих в них величин от расстояния до места КЗ:

$$\left. \begin{aligned} \underline{A} &= \underline{D} = \text{ch } \gamma l; & \gamma &= \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}; \\ \underline{B} &= \underline{Z}_C \text{sh } \gamma l; & \underline{Z}_C &= \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}; \\ C &= \frac{1}{\underline{Z}_C} \text{sh } \gamma l; \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

где  $\gamma$  — коэффициент распространения волны;  $\underline{Z}_C$  — волновое сопротивление;  $R, L, G, C$  — удельные параметры линии (на 1 км длины);  $l$  — длина участка линии, заменяемого четырехполюсником.

По приведенным формулам рассчитаны зависимости сопротивления на зажимах реле  $\underline{B}_I/\underline{D}_I$ , расчетных коэффициентов  $\underline{K}_I$  и  $\underline{K}_U$  от длины зоны действия реле  $l$ . Расчеты проведены для линий трех классов напряжения с параметрами схем прямой и нулевой последовательностей, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	Линия 500 кВ	Линия 750 кВ	Линия 1150 кВ
$\underline{Z}_{1C}$ , Ом	$280e^{-j3^\circ 30'}$	$255e^{-j2^\circ}$	$248e^{-j1^\circ 30'}$
$\gamma_l$ , $\frac{\text{рад}}{\text{км}}$	$1,06 \cdot 10^{-3}e^{j86^\circ 30'}$	$1,075 \cdot 10^{-3}e^{j88^\circ}$	$1,09 \cdot 10^{-3}e^{j88^\circ 30'}$
$\underline{Z}_{0C}$ , Ом	$630e^{-j5^\circ 40'}$	$550e^{-j5^\circ 20'}$	$495e^{-j5^\circ}$
$\underline{\gamma}_0$ , $\frac{\text{рад}}{\text{км}}$	$1,6 \cdot 10^{-3}e^{j84^\circ 20'}$	$1,66 \cdot 10^{-3}e^{j84^\circ 40'}$	$1,67 \cdot 10^{-3}e^{j85^\circ}$

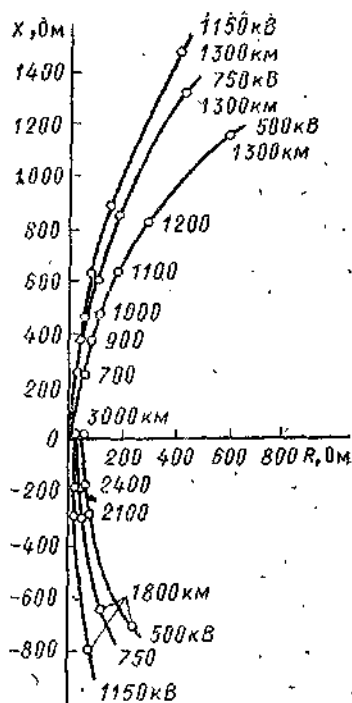


Рис. 22. Зависимость отношения  $B_1/D_1$  от расстояния до места КЗ на линиях 500, 750 и 1150 кВ

Зависимость расчетного сопротивления  $B_1/D_1$  от расстояния показана на рис. 22 для расстояний 0—1300 км и 1800—3000 км. Из рисунка следует, что сопротивление на зажимах реле при металлическом КЗ индуктивно лишь для расстояний до 1200 км, затем замедляется рост индуктивной составляющей и начинается быстрый рост активной составляющей сопротивления. При расстояниях до места КЗ в четверть волны тока прямой последовательности (1500 км) сопротивление  $B_1/D_1$  чисто активное и большое по значению (масштаб рис. 22 не позволил его показать). С дальнейшим ростом расстояния начинается уменьшение активной составляющей, и рост емкостной составляющей сопротивления. Наконец, при расстояниях

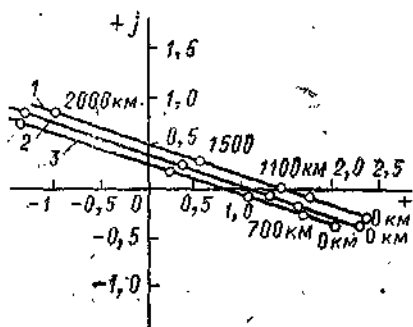


Рис. 23. Зависимость коэффициента  $K_1$  от расстояния до места КЗ на линиях:

1 — 500 кВ; 2 — 750 кВ; 3 — 1150 кВ

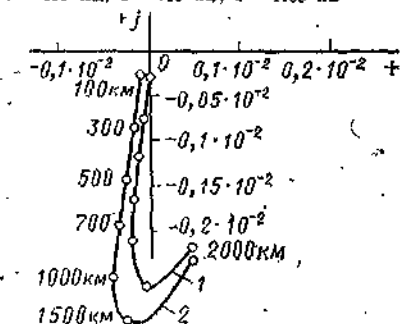


Рис. 24. Зависимость значения коэффициента  $K_U$  от расстояния до места КЗ на линиях:

1 — 500 кВ; 2 — 750 кВ и 1150 кВ

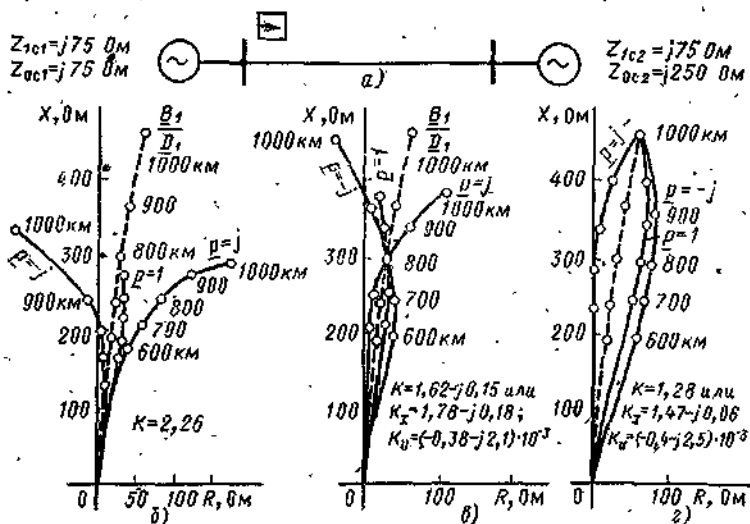


Рис. 25. Исходная схема длинной линии и сопротивления на зажимах реле при различной настройке устройства компенсации

1800—3000 км значение  $B_1/D_1$  является практически емкостным и уменьшается с приближением к полуволновой длине (3000 км).

Неблагоприятной для осуществления защиты особенностью компенсации на линиях большой протяженности является зависимость коэффициентов  $K_1$ ,  $K_U$  и  $K$  от расстояния до места КЗ, как это следует из (28)—(31). Характер этих зависимостей показан на рис. 23 и 24.

Так как на реле можно установить лишь одно значение коэффициента компенсации, то его следует принимать по протяженности зоны действия реле, т. е. нужно настроить схему компенсации на фиксацию КЗ в точке конца зоны. Тогда при КЗ в любой другой точке сопротивление на зажимах реле будет зависеть от вида КЗ и отношения ЭДС эквивалентных систем. Вид таких зависимостей показан на рис. 25, где приведена схема электропередачи 750 кВ длиной 1000 км (рис. 25,а), а также сопротивления на зажимах реле при однофазных КЗ в различных точках линии для трех случаев компенсации (рис. 25,б—г). Зависимости рис. 25,б соответствуют компенсации только по току нулевой последовательности с коэффициентом  $K=2,26$ , рассчитанным по (2) с учетом только продольных параметров линии. Зависимости



рис. 25,в соответствуют компенсации с коэффициентом по (30), рассчитанным на фиксацию КЗ в точке, удаленной на 800 км от места установки реле. Зависимости рис. 25,г соответствуют компенсации, рассчитанной на фиксацию КЗ в конце линии. Из приведенных зависимостей следует, что независимое от отношения ЭДС сопротивление на зажимах реле может иметь место лишь при КЗ в расчетной по настройке схемы компенсации точке.

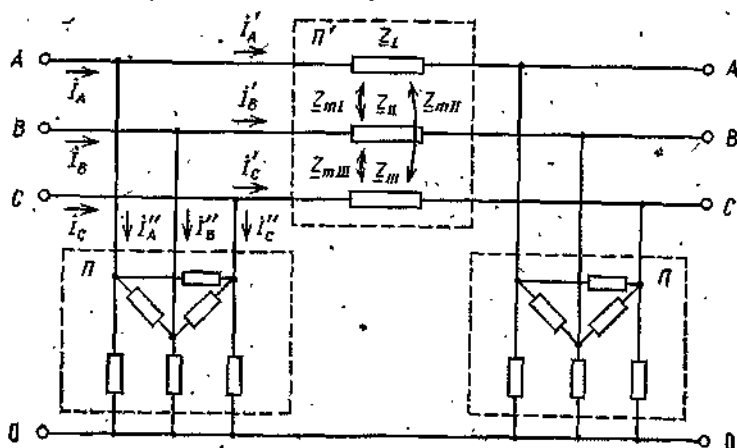


Рис. 26. П-образная схема замещения длинной нетранспонированной линии

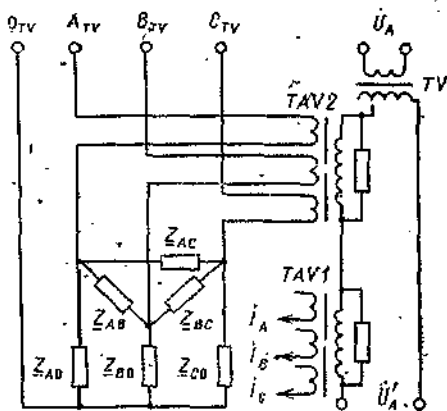
Рассмотрим самый общий случай сопротивления на зажимах реле, установленного на нетранспонированной линии большой протяженности.

Проведенные на ЭВМ расчеты показывают, что функционирование все же ранее рассмотренных схем компенсации на нетранспонированной линии большой протяженности крайне неудовлетворительно [17]. Точность фиксации становится недостаточной уже при расстояниях до места КЗ в 300—500 км. Однако существует теоретическая возможность обеспечения точной работы схемы компенсации. Она основывается на выводах [14] о необходимости компенсации с помощью токов трех фаз и напряжений трех фаз и доведена до схемной реализации в [18].

Идея схемы [18] может быть пояснена рис. 26, на котором длинная линия большой протяженности заменена эквивалентной П-образной схемой. Возможность такой замены и формулы для определения элементов П-образной схемы известны из [14].

Из рассмотрения приведенной схемы (рис. 26) следует, что нетранспонированная линия с распределенными параметрами эквивалентна некоторой нетранспонированной линии с сосредоточенными параметрами  $\Pi'$ , по которой проходит система токов  $I'_A, I'_B, I'_C$ . Они отличаются от токов в начале линии  $I_A, I_B, I_C$  за счет ответвления в поперечный элемент  $\Pi$  токов  $I''_A, I''_B, I''_C$ , пропорциональных только напряжениям в начале линии. Схема получения напряжения, компенсированного до конца нетранспонированной линии с сосредоточенными

Рис. 27. Схема компенсации для длинной нетранспонированной линии



параметрами, уже рассмотрена на рис. 19. Из схемы на рис. 26 следует, что компенсацию на линии большой протяженности можно осуществить как компенсацию падения напряжения в элементе  $\Pi'$  от токов  $I'_A, I'_B, I'_C$ , которые получаются, если из фазных токов в месте установки реле вычесть токи, ответвляющиеся в поперечный элемент схемы замещения линии. Фазные токи имеются в месте установки реле. Токи, ответвляющиеся в поперечный элемент, могут быть получены, если ко вторичным цепям трансформатора напряжения подключить набор сопротивлений, моделирующий поперечный элемент схемы замещения линии.

Такая схема компенсации показана на рис. 27. Она содержит набор сопротивлений  $Z_{AO}, Z_{BO}, Z_{CO}, Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}$ , моделирующий в определенном масштабе поперечный элемент схемы замещения линии, трансформаторы TAV1 и TAV2, промежуточный трансформатор напряжения TV. Очевидно, схема рис. 27 является самой общей, из которой можно получить все ранее рассмотренные схемы компенсации.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ В СХЕМАХ ОАПВ

#### 7. ТРЕБОВАНИЯ К ОРГАНУ ВЫБОРА ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

Однофазное автоматическое повторное включение (ОАПВ) — широко распространенный вид автоматики, особенно на линиях сверхвысокого напряжения. Выбор поврежденной фазы для осуществления ОАПВ — одна из важнейших областей использования дистанционного принципа в условиях КЗ на землю.

В настоящее время считается, что устройство ОАПВ линии с двусторонним питанием должно отключать поврежденную фазу при КЗ одной фазы на землю и обеспечивать ее повторное включение через промежуток времени, достаточный для погасания дуги в месте повреждения. Если повреждение не устранилось, устройство должно отключить все три фазы и не включать их повторно (если не предусмотрено повторное отключение одной фазы с переводом линии на длительную неполнофазную работу). Если в неполнофазном режиме цикла ОАПВ на оставшихся в работе фазах возникает повреждение, устройство должно (самостоятельно или совместно с релейной защитой) отключить оставшиеся в работе фазы и не производить их повторного включения.

На линиях электропередачи в качестве основной обычно применяется защита, не обладающая способностью различать поврежденную фазу. Поэтому, существенной частью схемы ОАПВ являются органы выбора поврежденной фазы — избирательные органы (ИО), которые устанавливаются по обоим концам защищаемой линии. Они должны удовлетворять следующим требованиям:

а) правильно выбирать поврежденную фазу при КЗ одной фазы на землю;

б) отличать КЗ одной фазы на землю от КЗ двух фаз на землю. Это требование легко удовлетворить, если при КЗ двух фаз на землю приходят в действие реле обеих поврежденных фаз;

в) защищать линию от повреждений, которые могут возникнуть на оставшихся в работе фазах в цикле ОАПВ. Данное требование вызвано тем, что часто релейная защита, установленная на линии, не обеспечивает надежного функционирования при замыканиях в неполнофазном режи-

ме и после повторного включения фазы с одной стороны на неустранившееся повреждение. Если имеется возможность, то функции защиты линии в указанных режимах передаются избирательным органам ОАПВ;

г) не срабатывать в неполнофазном режиме цикла ОАПВ от токов нагрузки;

д) иметь высокую чувствительность к КЗ через переходные сопротивления. В случае недостаточной чувствительности ИО считается допустимой их каскадная работа (когда ИО конца линии, удаленного от места КЗ, действует только после отключения фазы с противоположного конца линии);

е) быть быстродействующими, чтобы схема ОАПВ вносила минимальное замедление в процесс отключения КЗ. Требование быстродействия особо важно на линиях большой протяженности, где оно вызывает необходимость обеспечения правильного функционирования реле в условиях электромагнитных переходных процессов, сопровождающих КЗ. Отметим, что в этом отношении реле выбора фазы находятся в более легких условиях, чем реле измерительных органов дистанционных защит от междуфазных КЗ, так как КЗ на землю, особенно через переходное сопротивление, сопровождается менее интенсивным переходным процессом, чем междуфазное КЗ.

Избирательные органы могут не обеспечивать направленности и селективности действия, поскольку ОАПВ разрешается действовать только после срабатывания защит линий.

Известные ИО можно разбить на три большие группы:

1. Устройства, реагирующие на значение токов (напряжений) фаз и осуществляющие сравнение токов (напряжений) с уставкой срабатывания или сравнение токов (напряжений) трех фаз между собой.

2. Устройства, реагирующие на угловые соотношения между токами (напряжениями) различных фаз или последовательностей (направленные органы, называемые так потому, что основным элементом органа является реле направления мощности).

3. Устройства, основным элементом которых являются реле сопротивления — дистанционные избирательные органы.

Наиболее простыми являются устройства первой группы, но они удовлетворительно функционируют лишь на линиях с односторонним питанием. При этом на питающем конце линии целесообразно использовать устройства, реа-

гирующие на токи в фазах, а на приемном конце — на напряжения фаз.

Сравнение тока или напряжения с уставкой срабатывания не может обеспечить достаточной чувствительности к переходным сопротивлениям из-за необходимости отстройки уставки от значений нагрузочного режима. Гораздо большую чувствительность обеспечивает сравнение токов или напряжений трех фаз между собой. Например, на питающей стороне линии критерием КЗ на фазе А может считаться одновременное выполнение условий

$$I_A > I_B \text{ и } I_A > I_C.$$

Аппаратно устройство может быть выполнено на базе макси-селектора. На приемной стороне возможно применение устройств, использующих один из перечисленных ниже критериев [19]:

$$U_A + U_B + U_C > 3U_A;$$

$$U_B + U_C > 2U_A;$$

$$U_{BC} > \sqrt{3}U_A;$$

$$U_1 > U_A.$$

На линиях с двусторонним питанием ИО, реагирующие на токи или напряжения, не обеспечивают необходимой чувствительности, так как ОАПВ обычно применяется на линиях, на которых токи нагрузочного режима соизмеримы с токами КЗ или даже превосходят их.

Органы второй группы, особенно направленные фильтровые, могут быть полностью или частично независимы от влияния составляющих нагрузочного режима. Особенности их функционирования рассматриваются ниже.

## 8. НАПРАВЛЕННЫЕ ОРГАНЫ ВЫБОРА ОСОБОЙ ФАЗЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИДА КЗ

**Органы выбора особой фазы.** Классическим примером направленного ИО является широко известный фильтровый орган выбора особой фазы, реагирующий на угол между током  $I_0$  и током обратной последовательности фазы  $I_{2ф}$ . Принципиальная схема органа показана на рис. 28,а, векторная диаграмма, поясняющая его работу, — на рис. 28,б.

Избирательный орган состоит из трех реле направления мощности, к каждому из которых подведены токи  $I_0$  и  $I_{2ф}$ . При КЗ фазы А токи в месте замыкания  $I_{0к}$  и  $I_{2кА}$  совпадают между собой, поэтому и токи в месте установки ИО  $I_0 = C_{0р} I_{0к}$  и  $I_{2А} = C_{2р} I_{2кА}$  тоже близки по фазе.

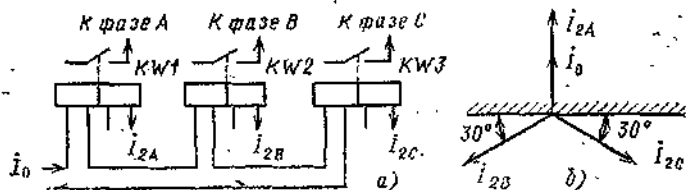


Рис. 28. Принципиальная схема - (а) и векторная диаграмма (б) фильтрового органа выбора особой фазы

поскольку углы комплексных величин  $C_{op}$  и  $C_{зд}$  обычно невелики. Векторная диаграмма токов в реле имеет вид рис. 28,б. Если условием срабатывания реле является

$$-90^\circ < \arg(I_{2\phi}/I_0) < 90^\circ$$

то из трех реле сработает лишь реле  $KW1$ , что свидетельствует о КЗ на фазе А. Угол селективности, обеспечивающий несрабатывание реле неповрежденных фаз, равен  $30^\circ$ .

При металлическом КЗ двух фаз на землю совпадают между собой токи  $I_0$  и  $I_2$  неповрежденной фазы, т. е. векторная диаграмма рис. 28,б верна и для металлического КЗ фаз ВС — земля, и в схеме вновь будет работать реле  $KW1$ . Следовательно, рассматриваемый ИО выбирает не поврежденную, а особую фазу. Он принципиально не может отличить однофазное КЗ от двухфазного на землю и для целей ОАПВ должен дополняться устройствами, выполняющими эту функцию.

Устройство по рис. 28 может быть усовершенствовано. Например, в Рижском политехническом институте (РПИ) разработан ИО, требующий только однофазного фильтра обратной последовательности и имеющий угол селективности неповрежденных фаз  $60^\circ$ . Принципиальная схема устройства показана на рис. 29.

Операционный усилитель  $A1$  с набором сопротивлений образует фильтр тока обратной последовательности фазы А. Напряжение с его выхода и напряжение  $mI_0$  подаются на вход фазосравнивающей схемы ФСС. В схеме сравнивается время совпадения знаков величин  $I_{2A}$  и  $I_0$  с заданным. Сравнение происходит так, что если угол  $\arg(I_{2A}/I_0)$  лежит в пределах  $-60^\circ$ — $+60^\circ$ , то имеется сигнал на выходе А; если тот же угол лежит в пределах  $60^\circ$ — $180^\circ$ , появляется сигнал на выходе С; если угол лежит в пределах  $180^\circ$ — $300^\circ$ , появляется сигнал на выходе В [9].

Практически те же результаты могут быть получены, если производить сравнение по углу не токов, а напряжений. Так, в [6, с. 103—106] описан ИО, определяющий особую фазу путем сравнения по углу напряжений  $U_{2A}$  и  $U_0$ . Угол селективности также равен  $60^\circ$ .

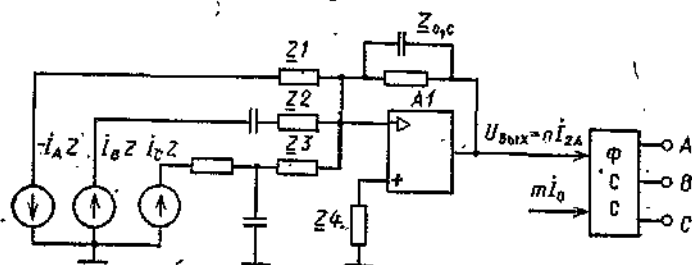


Рис. 29. Принципиальная схема органа выбора особой фазы по разработке РПИ

Для оценки рассмотренных ИО особой фазы определим, в каких пределах изменяется угол  $\arg(I_{2A}/I_0)$  при КЗ с особой фазой А. Уже отмечено, что при однофазных КЗ данный угол невелик и равен  $\arg(C_{2p}/C_{0p})$ . Его максимальное значение можно оценить в  $3 \dots 5^\circ$ . При КЗ двух фаз на землю отношение  $I_{2A}/I_0$  определяется формулой приложения П1:

$$\frac{I_{2A}}{I_0} = \frac{C_{2p}}{C_{0p}} \frac{Z_{0\text{эк}} + R_{0\text{н}}}{Z_{2\text{эк}} + R_{2\text{н}}}$$

С ростом общего переходного сопротивления ( $R_{\text{п,общ}}$  на рис. 17) угол  $\arg(I_{2A}/I_0)$  быстро растет и стремится к  $-90^\circ$ . В частности, при КЗ в начале линии (см. рис. 6) через  $R_{\text{п,общ}}$  в 5, 10 и 30 Ом угол  $\arg(I_{2A}/I_0)$  равен  $-40$ ,  $-60$  и  $-80^\circ$  соответственно, т. е. при КЗ с особой фазой А вектор  $I_{2A}$  может располагаться на плоскости (рис. 30) в первом квадранте. Очевидно, все рассмотренные выше органы выбора особой фазы при двухфазных КЗ на землю могут работать неверно. Условия выбора особых фаз должны иметь следующий вид [21]:

$$-105^\circ < \arg(I_{2A}/I_0) < 15^\circ \text{ — для особой фазы А,}$$

$$135^\circ < \arg(I_{2A}/I_0) < 255^\circ \text{ — для особой фазы В,}$$

$$15^\circ < \arg(I_{2A}/I_0) < 135^\circ \text{ — для особой фазы С.}$$

Предлагаемая характеристика показана на рис. 30.

Все направленные органы имеют два больших достоинства: независимость функционирования от токов нагрузочного режима и принципиальная возможность обеспечения большой чувствительности к переходным сопротивлениям. Первое объясняется участием в алгоритме функционирования составляющих прямой последовательности. Второе

объясняется сравнением не значений, а угловых соотношений между составляющими обратной и нулевой последовательности, которые при однофазном КЗ не зависят от значения  $R_{\Sigma}$ . Достижимая чувствительность ИО к  $R_{\Sigma}$  определяется лишь качеством схем сравнения величин по фазе.

В неполнофазном режиме цикла ОАПВ орган выбора особой фазы четко выбирает отключенную фазу. Гораздо хуже функционирует орган в режиме каскадного отключения поврежденной фазы. Такой режим возникает кратковременно практически в каждом случае КЗ, а также в случаях неуспешного повторного включения фазы.

Токи обратной и нулевой последовательности в режиме каскадного отключения фазы определяются с использованием расчетных выражений приложения ПЗ следующим образом.

При отключении замкнувшейся фазы  $A$  только с ближайшего к месту установки ИО конца линии

$$\left. \begin{aligned} I_{2A} &= (\underline{H}\underline{W} + \underline{C}_{1p})I_{1K}; \\ I_0 &= [\underline{C}_{0p} - \underline{W}(1 + 2\underline{H})]I_{1K}. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

При отключении замкнувшейся фазы  $A$  только с удаленного конца линии

$$\left. \begin{aligned} I_{2A} &= [\underline{G}(3 - \underline{W}) + \underline{C}_{1p}]I_{1K}; \\ I_0 &= [\underline{C}_{0p} + (3 - \underline{W})(1 + \underline{R})]I_{1K}. \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

В приведенных выражениях  $I_{1K}$  — ток в месте КЗ до начала каскадного отключения;

$$\underline{W} = 2\underline{C}_{1p} + \underline{C}_{0p} + \Sigma \underline{Z}^{(1)} / (\underline{Z}^{(n)} - \underline{Z}_{1K});$$

$\underline{H}$ ,  $\underline{G}$ ,  $\underline{R}$  — параметры, значения которых определяются формулами приложения ПЗ.

Расчеты по (32) и (33) показывают, что функционирование органов выбора особой фазы в режиме каскадного отключения одной фазы будет чаще всего неправильным. Угол  $\arg(I_{2A}/I_0)$ , определенный по (32), равен  $180^\circ$  при бесконечно большом сопротивлении  $Z^{(n)}$ , а при снижении  $Z^{(n)}$  быстро меняется и может принимать любое значение. Тот же угол, определенный по (33), при  $Z^{(n)} = \infty$  близок к  $0^\circ$ , а при снижении  $Z^{(n)}$  изменяется в небольших пределах, примерно до  $\pm(10 \dots 60^\circ)$ . Поэтому ИО, сравнивающие  $I_2$  и  $I_0$ , при каскадном отключении фазы стремятся переориентироваться, особенно орган на бл.

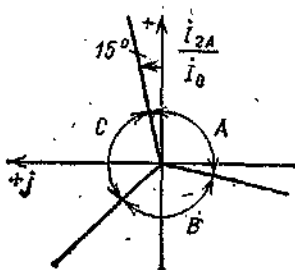


Рис. 30. Угловая характеристика органа выбора особой фазы



жайшем к месту отключения фазы конце линии. Поэтому в устройствах ОАПВ с фильтровыми ИО принято фиксировать первоначальное срабатывание ИО на все время цикла ОАПВ.

**Устройства определения вида КЗ.** Поскольку направленные ИО не могут отличать однофазное КЗ от КЗ двух фаз на землю, появляется необходимость в устройствах определения вида КЗ. Известно большое количество таких устройств. Однако все они подвержены влиянию составляющих нагрузочного режима, т. е. могут функционировать неправильно при достаточно большом расхождении по углу между ЭДС эквивалентных систем, между которыми расположена линия. Перечислим некоторые из устройств определения вида КЗ.

**Устройство 1 [9].** Короткое замыкание с особой фазой *A* считается однофазным, если

$$-60^\circ < \arg(I_{2A}/I_{1A}) < 60^\circ.$$

**Устройство 2 [6, с. 103—106].** Короткое замыкание с особой фазой *A* считается однофазным, если

$$120^\circ < \arg(U_{2A}/U_{1A}) < 240^\circ.$$

**Устройство 3 [7].** Короткое замыкание с особой фазой *A* считается однофазным, если ток  $I_0$  отстает от напряжения фазы *A*, т. е. если

$$-180^\circ < \arg(I_0/U_A) < 0^\circ.$$

**Устройство 4 [7].** Короткое замыкание с особой фазой *A* считается однофазным, если

$$90^\circ < \arg(U_{CA}/I_0) < 270^\circ.$$

**Устройство 5.** Приведенные в [9] и [6] обоснования для предельных углов устройства 2 верны лишь при отсутствии предварительного выбора особой фазы. Но если особая фаза уже известна, то целесообразно [21] расширить пределы углов, т. е. считать КЗ однофазным, если

$$90^\circ < \arg(U_{2A}/U_{1A}) < 270^\circ.$$

**Устройство 6.** В [7] описан вариант сочетания органа выбора особой фазы с реле сопротивления (РС), включенным на петлю междуфазного КЗ, т. е. КЗ с особой фазой *A* считается однофазным, если при нем не работает РС, включенное на напряжение  $U_{BC}$  и на ток  $I_B - I_C$ . Идея такого сочетания в том, что при КЗ фаз *B* и *C* на землю подобное РС срабатывает независимо от значения общего переходного сопротивления, если уставка РС больше сопротивления линии. В то же время при КЗ фазы *A* на землю сопротивление на зажимах РС определяется только составляющими нагрузочного режима и равно  $Z^{(n)}$  независимо от места КЗ и значения переходного сопротивления.

Функционирование всех вышеперечисленных устройств зависит от составляющих нагрузочного режима. Для анализа этой зависимости

удобно использовать построение характеристик устройств в плоскости  $Z^{(n)}$ . Способ построения подобных характеристик для устройств 1—5 рассмотрен в [21]. Для оценки устройства 6 можно использовать общезвестные методы анализа функционирования РС при полнофазных качаниях.

Построение характеристик рассматриваемых устройств для случаев КЗ в конце линии (см. рис. 6) позволяет сделать следующие выводы:

- а) устройство 1 весьма подвержено влиянию составляющих нагрузочного режима, поэтому его применение нецелесообразно;
- б) устройство 2 всегда функционирует хуже, чем устройство 5;

Таблица 3

Устройство	Диапазоны углов, град, при КЗ			
	одной фазы на землю		двух фаз на землю ( $R_{н.ф}=0$ )	
	$R_{н}=0$	$R_{н}=30 \text{ Ом}$	$R_{н.общ}=0$	$R_{н.общ}=30 \text{ Ом}$
3	$-142 \div 125$	$-160 \div 68$	$-145 \div 130$	$-165 \div 60$
4	$-87 \div 170$	$-130 \div 150$	$-72 \div 165$	$-140 \div 135$
5	$-142 \div 125$	$-160 \div 80$	$-142 \div 124$	$-140 \div 135$
6 ( $Z_y=1,2 Z_n$ )	$-125 \div 135$	$-125 \div 135$	$0 \div 360$	$0 \div 360$

в) диапазоны углов, соответствующих правильному функционированию устройств 3—6, сведены в табл. 3.

Из табл. 3 можно сделать вывод, что ни одно из устройств не обеспечивает правильного функционирования при значительных углах между ЭДС эквивалентных систем.

## 9. ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ ОРГАНЫ НА ОСНОВЕ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В дистанционных ИО для выбора поврежденной фазы используются три реле сопротивления, каждое из которых включено на  $U_\phi$  и  $(I_\phi + KI_0)$ . Характеристики РС должны обеспечить выполнение всех перечисленных выше требований к ИО.

Для четкого представления о функционировании РС выбора фазы следует рассмотреть все основные режимы цикла ОАПВ: режим КЗ (рис. 31,а), режимы каскадного отключения поврежденной фазы с ближайшего и с удаленного концов (рис. 31,б и в), неполнофазный режим (рис. 31,г) и послеаварийный полнофазный режим (на рисунке не показан).

Наиболее полное представление о функционировании РС на конкретной электропередаче дает построение круговых диаграмм сопротивлений на зажимах реле трех фаз во всех расчетных режимах, т. е. построение областей, ограниченных дугами  $p = \text{const}$  и  $\delta = \text{const}$ . Примеры таких диаграмм даны ниже, они строятся по формулам приложения ПЗ.

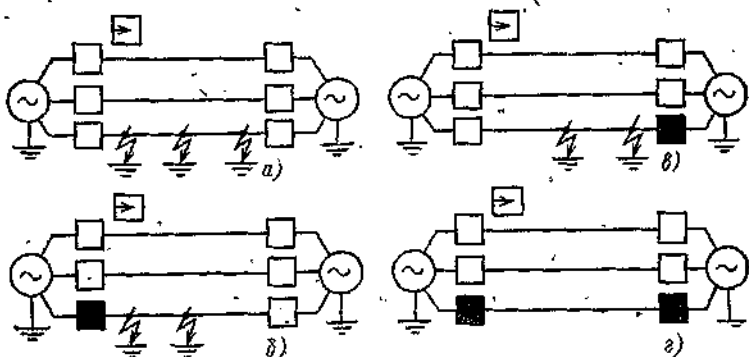


Рис. 31. Основные расчетные режимы цикла ОАПВ.

Однако если речь идет не о конкретной электропередаче, а о целом классе линий, то круговые диаграммы могут дать лишь качественное представление о функционировании РС. Ниже для количественной оценки наряду с круговыми диаграммами используются результаты расчетов на ЭВМ методом статистических испытаний. Применимость метода для сравнения между собой устройств защиты и автоматики обоснована в [11].

Метод статистических испытаний предполагает многократное повторение расчетов сопротивлений на зажимах реле в интересующих исследователя режимах, причем параметры расчетной схемы каждый раз получаются от генератора псевдослучайных чисел. Для каждого параметра следует заранее принять возможный диапазон изменения и закон распределения значений параметра внутри этого диапазона. Тогда результат достаточно большого количества расчетов позволит оценить вероятность правильного (неправильного) функционирования устройства.

Диапазоны изменения отдельных параметров (длины линии, сопротивлений систем,  $p$ ,  $R_n$ ,  $\delta$  и т. д.) достаточно хорошо известны для линий каждого класса напряжения. Но сведения о законе распределения некоторых параметров внутри диапазона иногда спорны (например, о зако-

не распределения значений  $R_n$ ). В этом случае в [11] предложено принимать закон распределения равномерным и считать все параметры независимыми один от другого. Результат расчетов с принятыми допущениями нельзя рассматривать как вероятность правильного (неправильного) функционирования исследуемого устройства. Но по результатам можно сравнивать различные устройства между собой и определять диапазоны отдельных параметров, в которых устройство функционирует только правильно.

Таблица 4

Параметр	$Z_{1c1}, Z_{1c2},$ Ом	$\arg Z_{1c}$	$Z_{1л},$ Ом	$Z_{0c1}, Z_{0c2},$ Ом	$p$
Минимальное значение	3	70°	20	3	0,7
Максимальное значение	40	90°	60	40	1,4

Примечание.  $Z_{0л} = 3,5 Z_{1л}$ ;  $\arg Z_{1л} = 75^\circ$ ;  $\arg Z_{0л} = 79,5^\circ$ .

Ниже, если нет специальных оговорок, при расчетах методом статистических испытаний приняты диапазоны изменения параметров схемы электропередачи 220 кВ, указанные в табл. 4.

Диапазоны изменения углов между ЭДС и значений переходных сопротивлений будут указываться отдельно. Характеристика РС ИО считается имеющей вид окружности с центром в точке  $Z_{1л}$  и с радиусом  $1,1 Z_{1л}$ .

С учетом сказанного переходим к рассмотрению отдельных режимов цикла ОАПВ.

**Неполнофазный и послеаварийный режимы.** Примеры диаграмм сопротивлений на зажимах РС, установленных на передаче (см. рис. 6), в неполнофазном ( $Z^{(1,2)}$ ) и на грузочном режимах ( $Z^{(n)}$ ) приведены на рис. 32. На плоскость  $\bar{U}_\phi / (I_\phi + 2,21 I_0)$  нанесены дуги окружностей  $p = 0,8$ ,  $p = 1,2$ ,  $\delta = \pm 90^\circ$ ,  $\delta = \pm 60^\circ$ , ограничивающие области возможных значений сопротивлений на зажимах реле.

Послеаварийный (нагрузочный) режим симметричен, и сопротивления  $Z^{(n)}$  (сплошная линия на рисунке) на зажимах реле всех трех фаз равны между собой. Неполнофазный режим несимметричен, поэтому  $Z_B^{(1,2)}$  (пунктирная линия) и  $Z_C^{(1,2)}$  (штрихпунктирная линия) не равны между собой. Сопротивления на зажимах РС в неполнофаз-

ном режиме расположены ближе к оси сопротивления линии, чем сопротивление  $Z^{(n)}$ , соответствующее тому же отношению ЭДС  $\underline{p}$ . Однако разница между  $Z_{\underline{A}}^{(1,2)}$  и  $Z^{(n)}$  относительно невелика.

Сопротивление на зажимах РС отключенной фазы  $Z_{\underline{A}}^{(1,2)}$  зависит от места подключения трансформатора напряжения (к шинам или к линии) и не представляет интереса, поскольку в логической части устройства ОАПВ предусмотрена фиксация срабатывания каждого РС.

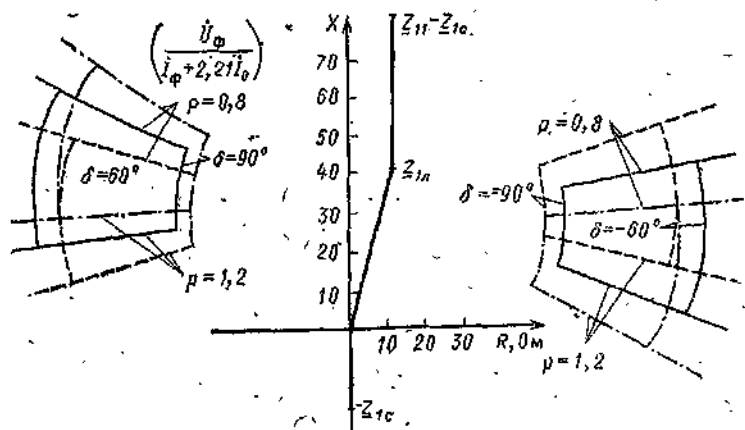


Рис. 32. Сопротивления на зажимах ИО в неполнофазном и послеаварийном режимах

Оценить опасность срабатывания РС в нагрузочном и неполнофазном режимах позволяет табл. 5, в которой отражены результаты расчета методом статистических испытаний (число срабатываний РС из 1000 испытаний). Параметры передачи брались в диапазонах по табл. 4. Для выявления влияния угла между ЭДС расчет произведен отдельно для шести диапазонов изменения угла. Для каждого диапазона проведено 1000 испытаний, при каждом испытании определялись величины  $Z^{(n)}$ ,  $Z_{\underline{B}}^{(1,2)}$ ,  $Z_{\underline{C}}^{(1,2)}$

и проверялось функционирование РС с двумя коэффициентами компенсации по току нулевой последовательности:  $K=2,5$  и  $K=0$ .

Данные табл. 5 позволяют сделать ряд выводов:

а) при углах между ЭДС эквивалентных систем до  $\pm 50^\circ$  реле с исследуемой характеристикой не подвержено

срабатыванию в неполнофазном и послеаварийном режимах;

б) при дальнейшем росте угла появляется опасность излишнего срабатывания, которая в неполнофазном режиме значительно больше, чем в послеаварийном. Если  $K=2,5$ , то на передающем конце линии ( $\delta < 0$ ) в худших условиях находится реле фазы В, на приемном конце — реле фазы С. При  $K=0$  имеет место обратная картина;

Таблица 5

Диапазон изменения $\delta$ , град.	Число срабатываний РС на 1000 испытаний				
	Послеаварийный режим	Неполнофазный режим с отключением фазы А			
		$K=2,5$		$K=0$	
		РС фазы В	РС фазы С	РС фазы В	РС фазы С
0÷50	0	0	0	0	0
50÷75	20	15	73	88	0
75÷90	214	192	510	483	9
0÷-50	0	0	0	0	2
-50÷-75	29	85	46	0	122
-75÷-90	257	537	344	5	576

в) снижение коэффициента компенсации  $K$  не приводит к улучшению функционирования РС в неполнофазном режиме.

В неполнофазном режиме РС двух фаз находятся в неравных условиях. Характеристику приходится выбирать по РС фазы, находящейся в худших условиях. Если подробно проанализировать формулы приложения ПЗ, можно прийти к выводу, что в неполнофазном режиме сопротивления на зажимах РС фаз В и С будут примерно одинаковы при  $K \approx (Z_{00} - Z_{11})/Z_{11}$ .

Из табл. 5 и рис. 32 ясно, что с увеличением  $\delta$  конец вектора сопротивления на зажимах РС в рассматриваемых режимах приближается к оси сопротивления линии, что затрудняет выбор характеристики. Начиная с определенных углов, обеспечить несрабатывание РС невозможно. В таком случае принято не оставлять РС в работе после отключения фазы. Однако при этом РС ИО не выполняют функцию защиты линии в неполнофазном режиме и приходится принимать определенные меры, чтобы обеспечить отключение фазы в случае ее включения на неустранившемся КЗ.

Короткое замыкание на землю в полнофазном режиме. При КЗ на землю в пределах линии необходимо обеспе-

чить чувствительность РС поврежденной фазы (фаз) и несрабатывание РС неповрежденных фаз.

Характер сопротивлений на зажимах РС при однофазных КЗ на линии (см. рис. 6) иллюстрируется рис. 33 и 34. На рис. 33, в частности, показаны области расположения конца вектора сопротивления на зажимах реле поврежденной фазы  $Z_A^{(i)}$  при КЗ в начале линии через  $R_n=30$  Ом и в конце линии через 10 и 30 Ом (области 3, 1 и 2). Принято, что соотношение между ЭДС изменяется в пределах  $p=(0,8 \div 1,2) \cdot e^{\pm j90^\circ}$ , поэтому каждая область ограничена четырьмя дугами. Расположение областей 1, 2 и 3 показывает, что для обеспечения чувствительности РС поврежденной фазы к КЗ через переходные сопротивления необходимо иметь характеристику, занимающую значительную часть первого квадранта и неболь-

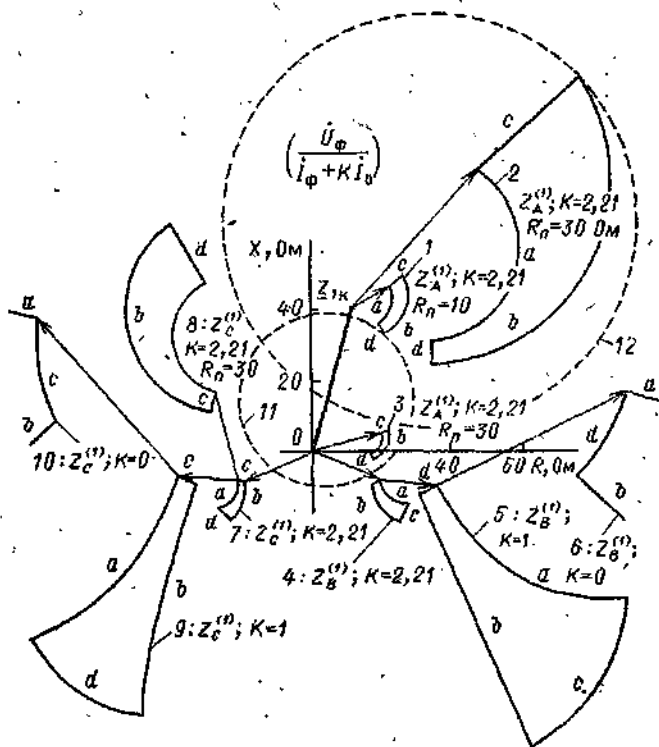


Рис. 33. Сопротивления на зажимах РС ИО при однофазных КЗ в начале и конце линии рис. 6:

$a$  — дуга при  $p=0,8$ ;  $b$  — дуга при  $p=1,2$ ;  $c$  — дуга при  $\delta=60^\circ$ ;  $d$  — дуга при  $\delta=-60^\circ$

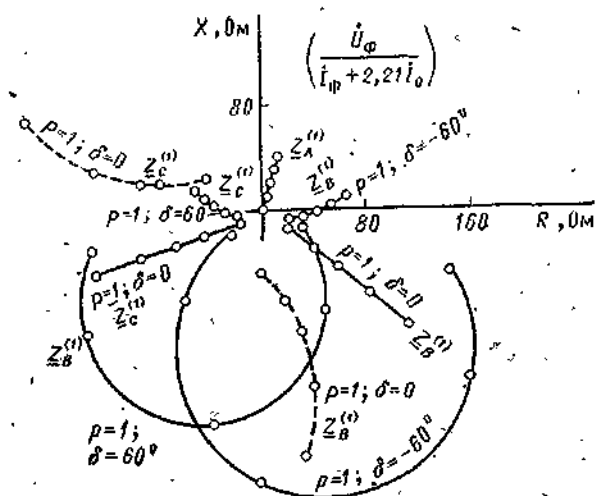


Рис. 34. Изменение сопротивления на зажимах РС ИО при удалении места КЗ на линии рис. 6:

—  $R_n=0$ ; - - - - -  $R_n=30 \text{ Ом}$

шую часть четвертого квадранта комплексной плоскости.

Наибольшее отклонение сопротивления на зажимах РС фазы А от  $Z_{1л}$  при заданном  $R_n$  имеет место при КЗ в конце линии при максимальном значении  $p$  и максимальном положительном угле  $\delta$ . Учитывая связь между значениями  $p$ ,  $\delta$  и перетоком мощности по линии, можно сказать, что расчетным по чувствительности к переходным сопротивлениям является режим приема максимальной реактивной и активной мощностей.

Ранее уже были рассмотрены однофазные КЗ на той же линии при более широком диапазоне изменения  $R_n$  и  $\delta$  (см. рис. 13, 15). Кроме того, рассмотрены КЗ двух фаз на землю (см. рис. 17), откуда, в частности, следует, что для обеспечения срабатывания двух РС при двухфазных замыканиях на землю характеристика РС должна охватывать и некоторую часть второго квадранта плоскости. Тогда ИО обеспечит при КЗ двух фаз вполне удовлетворительную чувствительность к общему переходному сопротивлению.

Пример характеристики РС, обеспечивающей достаточную чувствительность к КЗ на землю через переходные сопротивления, показан на рис. 33 пунктирными окружностями 11 и 12. Принято, что характеристика



состоит из двух пересекающихся окружностей. Целесообразность использования таких двухэлементных характеристик показана в [26].

Весьма сложна задача обеспечения селективности РС неповрежденных фаз при однофазных КЗ в пределах линии. На рис. 33 показаны сопротивления на зажимах реле фаз *B* (области 4, 5, 6) и *C* (области 7, 8, 9, 10) при КЗ фазы *A* в начале линии. Области 4, 7 и 8 соответствуют номинальному значению коэффициента компенсации по току  $I_0$  ( $K=2,21$ ), области 5, 6, 9 и 10 — уменьшенному значению  $K$ . При  $K=2,21$  размеры характеристики РС могут ограничиваться сопротивлениями на зажимах реле фаз *B* и *C* при металлических КЗ фазы *A* (области 4 и 7) и сопротивлениями на зажимах реле фазы *C* при КЗ фазы *A* через переходное сопротивление (область 8). Область 8 может ограничивать возможности охвата характеристикой части второго квадранта плоскости.

Области 4 и 7 часто располагаются весьма близко к началу координат. Столь малое значение сопротивлений объясняется тем, что хотя напряжение неповрежденной фазы  $U_\phi$  велико, а ток фазы мал, отношение  $U_\phi / (I_\phi + KI_0)$  может быть малым из-за больших значений тока  $I_0$ , входящего в знаменатель формулы. Области 4 и 7 ограничивают возможности смещения характеристики в четвертый квадрант. В таком случае принято уменьшать значение коэффициента компенсации  $K$  (в случае двухэлементной характеристики — только у элемента, образующего нижнюю окружность). Изменение сопротивления на зажимах реле при снижении  $K$  до единицы или до нуля можно проследить по областям 5, 6, 9 и 10 рис. 33. Со снижением  $K$  сопротивления на зажимах реле уходят от начала координат, приближаясь по характеру к сопротивлениям нагрузочного режима.

На рис. 33 видно, что РС с  $K=1$  имеет лучшую селективность относительно показанной пунктиром характеристики, чем РС с  $K=0$ . Поэтому не точно распространенное мнение, что наилучшей селективностью обладают РС без компенсации по току нулевой последовательности.

Расчеты по методу статистических испытаний подтверждают приведенные выше соображения. Для примера в табл. 6 приведены данные, характеризующие функционирование реле фаз *B* и *C* при однофазном КЗ фазы *A* в начале линии. Как и ранее, диапазоны изменения параметров передачи соответствуют табл. 4, характеристика реле имеет центр в точке  $Z_{1л}$  и радиус  $1,1Z_{1л}$ .

Таблица 6

Диапазон изменения $\delta$ , град	Число срабатываний РС на 1000 испытаний							
	РС фазы В с коэффициентом К				РС фазы С с коэффициентом К			
	0	0,5	1	2,5	0	0,5	1	2,5
0÷60	2/0	0	1/0	51/0	1/0	0/8	4/46	51/355
60÷75	34/8	0	0	41/0	20/37	12/146	21/278	89/645
75÷90	162/114	6/8	0	42/0	99/229	48/375	52/520	121/785
0÷-60	2/1	4/0	13/0	118/0	2/3	0/8	0/31	19/275
-60÷-75	24/24	35/0	72/0	215/0	72/128	0/174	0/245	12/476
-75÷-90	148/171	119/15	144/1	257/0	251/337	1/406	0/454	12/642

Примечание. В каждой позиции табл. 6 помещены две цифры—верхняя соответствует числу срабатываний РС при 1000 металлических КЗ, нижняя—числу срабатываний РС при 1000 КЗ через сопротивление в 30 Ом.

Расчеты приведены отдельно для шести диапазонов углов между ЭДС.

Данные табл. 6 подтверждают, что при металлическом КЗ и значении коэффициента компенсации, близком к расчетному, наиболее опасны ложные срабатывания реле фазы В на передающем конце линии и реле фазы С на приемном. Опасность срабатывания уменьшается со снижением значения коэффициента К (примерно до  $K=1$ ), но вновь возрастает при  $K=0$ . Следовательно, существует определенный оптимум для снижения коэффициента К. Наличие переходных сопротивлений весьма благоприятно сказывается на функционировании РС фазы В, но неблагоприятно—на РС фазы С. Рост значения  $\delta$  ухудшает селективность РС неповрежденных фаз.

Селективность РС фаз В и С должна обеспечиваться при КЗ по всей длине линии. Качественная картина изменения сопротивления на зажимах РС при перемещении места КЗ на фазе А приведена на рис. 34 применительно к линии рис. 6. С удалением КЗ—конца вектора сопротивления на зажимах реле перемещается по дуге окружности. На рисунке на каждой дуге обозначены пять точек КЗ, равномерно распределенных вдоль линии. Рассмотрен случай равенства ЭДС по значению  $p=1$ , но разных углов между ЭДС:  $+60^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-60^\circ$ . Для случая  $\delta=0^\circ$  показаны сопротивления и при металлическом КЗ, и при КЗ через 30 Ом.

Из рис. 34 следует, что с удалением места КЗ сопротивления  $Z_B^{(1)}$  и  $Z_C^{(1)}$  уходят от начала координат, приближаясь к области, в которой лежат сопротивления на грузочного режима при данном угле между ЭДС. При  $\delta < 0^\circ$  сопротивления  $Z^{(n)}$  лежат в первом квадранте плоско-

сти, и конец вектора  $Z_B^{(1)}$  идет в этот квадрант по короткой дуге, а конец  $Z_C^{(1)}$  — по длинной. При  $\delta=0^\circ$  оба сопротивления  $Z_B^{(1)}$  и  $Z_C^{(1)}$  перемещаются по прямым, поскольку  $Z^{(0)}$  лежит в бесконечности. При  $\delta>0^\circ$  с удалением точки КЗ сопротивления стремятся во второй квадрант, причем конец  $Z_C^{(1)}$  может идти туда по короткой дуге, а конец  $Z_B^{(1)}$  — по длинной.

Короткие дуги могут заходить в характеристику РС частями, соответствующими КЗ в промежуточных точках линии. По рекомендации [25] опасность такого захода оценивается проверкой селективности РС при КЗ в середине линии. Длинные дуги могут зайти внутрь характеристики частью, соответствующей КЗ в конце линии. Поэтому селективность РС проверяется и при этих КЗ.

Для количественной оценки опасности потери селективности при КЗ в середине и конце линии были произведены статистические испытания, результаты которых сведены в табл. 7.

Таблица 7

Диапазон изменения $\delta$ , град	Число срабатываний РС на 1000 испытаний при КЗ			
	в середине линии		в конце линии	
	РС фазы В	РС фазы С	РС фазы В	РС фазы С
0÷50	0	0/8	0	3/4
50÷75	0	24/240	27/13	85/77
75÷90	0/4	246/636	151/214	391/317
0÷-50	0	0	2/0	1/0
-50÷-75	46/2	0/7	70/17	45/20
-75÷-90	395/54	1/83	349/244	192/217

Примечание. Верхняя цифра соответствует числу срабатываний РС при 1000 металлических КЗ, нижняя — при 1000 КЗ через переходное сопротивление в 30 Ом.

Данные табл. 7 позволяют считать невозможным или крайне редким срабатыванием РС фазы В при КЗ в середине линии при углах  $-50^\circ < \delta < 75^\circ$ , фазы С при КЗ в середине линии при углах  $-50^\circ < \delta < 0^\circ$  и фазы В при КЗ в конце линии при  $0^\circ < \delta < 50^\circ$ . В остальных случаях необходима проверка селективности РС. При этом селективность РС фазы В следует проверять при металлических КЗ, а фазы С — при КЗ через переходные сопротивления (напомним, что приведенные рекомендации верны лишь для принятой характеристики РС или для характеристики, уместящейся внутри принятой).

Каскадное отключение КЗ со стороны установки устройства ОАПВ (каскад по рис. 31,б). В рассматриваемом режиме интерес представляет функционирование РС неповрежденных фаз, поскольку РС поврежденной фазы уже сработало и временно выведено из действия логической схемой устройства ОАПВ. Можно рассматривать лишь КЗ через переходные сопротивления в начале линии, поскольку именно при таких КЗ чувствительность РС устройства противоположной стороны линии может быть недостаточна для одновременного отключения фазы с двух сторон.

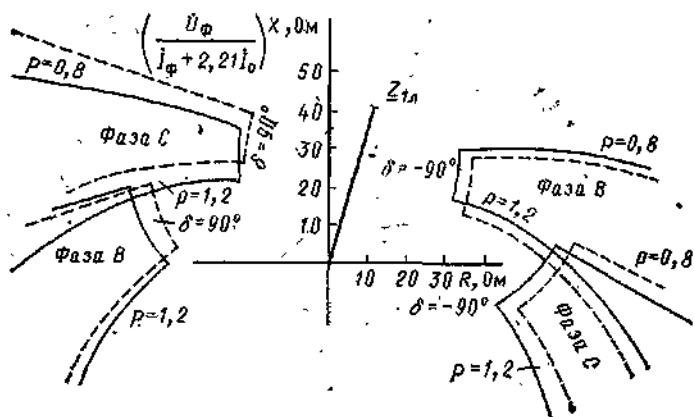


Рис. 35. Сопротивления на зажимах РС ИО при каскадном отключении КЗ по схеме рис. 31,б:

—  $R_n = 0$ ; - - - - -  $R_n = 30 \text{ Ом}$

Качественная картина — диаграммы сопротивлений на зажимах РС фаз В и С при каскадном отключении фазы А на линии (см. рис. 6) — представлена на рис. 35. Рассмотрены КЗ металлические и через 30 Ом. Наличие переходного сопротивления несколько улучшает селективность реле фазы В, но ухудшает селективность реле фазы С. А вообще, диаграммы каскадного отключения близки по характеру к диаграммам неполнофазного режима, но гораздо ближе расположены к оси сопротивления линии.

Результаты исследования каскадного режима методом статистических испытаний (число срабатываний РС из 1000 расчетов) отражены в табл. 8. Методика исследования и характеристика РС — те же, что и при составлении табл. 5—7.

при принятой характеристике была всегда достаточной на приемном конце линии, но иногда недостаточной на передающем конце (напомним, что согласно рис. 33 при КЗ в полнофазном режиме большей чувствительностью обладают РС передающего конца линии).

Из сравнения табл. 9 и 7 можно заключить, что при углах между ЭДС, меньших  $\pm 75^\circ$ , селективность РС неповрежденных фаз улучшается после отключения фазы с противоположной стороны линии. Однако при больших углах селективность РС неповрежденных фаз ухудшается.

Таблица 9

Диапазон изменения $\delta$ , град	Число срабатываний РС на 1030 испытаний при КЗ					
	в середине линии			в конце линии		
	РС фазы А	РС фазы В	РС фазы С	РС фазы А	РС фазы В	РС фазы С
0÷50	1000	0	0	1000	0	0
50÷75	1000	0	19	1000	7	40
75÷90	1000	2	277	1000	96	441
0÷-50	1000	0	0	985	0	0
-50÷-75	986	0	49	880	30	36
-75÷-90	946	2	349	764	354	253

Таблицы 5—9 позволяют дать общую оценку свойств РС ИО ОАПВ на линиях 220 кВ при принятых в табл. 4 диапазонах изменения параметров и с принятой характеристикой (окружность с центром в точке  $Z_{1A}$  и с радиусом  $1,1Z_{1A}$ ). Цифры таблиц указывают, что селективность РС неповрежденных фаз обеспечивается на всех линиях при углах между ЭДС, не превышающих примерно  $\pm 50^\circ$ . Чувствительность к КЗ через переходные сопротивления до 30 Ом даже при каскадном отключении обеспечивается безусловно только на приемном конце линии.

Конечно, на конкретной линии часто удается подобрать характеристики РС, удовлетворяющие всем требованиям. Большую роль при этом играют такие решения, как снижение коэффициента компенсации по току нулевой последовательности, отказ от использования РС для защиты линии в неполнофазном режиме, применение РС с двухэлементными характеристиками, допущение каскадного отключения КЗ, ввод зависимости режима работы ИО от наличия или отсутствия параллельной линии и т. д. Однако ясно, что проблема выбора фазы в настоящее время еще не может считаться окончательно решенной.

## 10. РАСЧЕТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ЗАЖИМАХ РЕЛЕ В ЦИКЛЕ ОАПВ. ВОЗМОЖНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОРГАНОВ ВЫБОРА ФАЗЫ

Как следует из материалов § 9, для обоснованного выбора характеристики РС ИО следует произвести многочисленные и довольно сложные расчеты сопротивлений на зажимах РС в ряде режимов. Некоторые из этих режимов являются сложными несимметричными. Несомненно, в настоящее время подобные расчеты должны производиться с помощью ЭВМ.

Сопротивления на зажимах реле сильно зависят от соотношения ЭДС по значению и по углу, т. е. от характера электромеханического переходного процесса, сопровождающего цикл ОАПВ. Электромеханический процесс можно исследовать на моделях или рассчитывать по специальным программам. В данной книге этот вопрос не рассматривается. Предполагается, что значения и углы ЭДС уже известны для всех исследуемых режимов.

Принципиально возможен ряд путей расчета сопротивлений на зажимах РС. В частности, для одиночной линии без обходных связей и при пренебрежении поперечными проводимостями несложно запрограммировать расчет по формулам приложения ПЗ. Однако ясно, что при наличии у линии обходных связей или при необходимости учета поперечных параметров длинной линии формулы настолько усложнятся, что их использование станет нецелесообразным.

Существует много методов, позволяющих рассчитывать электрические величины сложной несимметрии с помощью универсальных или специализированных программ расчета токов КЗ. Остановимся на одном из них, связанном с использованием симметричных составляющих и специальных многополюсников, имитирующих граничные условия в местах несимметрии. Теоретические положения, позволяющие вводить такие многополюсники, рассмотрены в [27].

Использование многополюсников несимметрии для расчета электрических величин в цикле ОАПВ линии с обходными связями пояснено на рис. 37. Вся расчетная схема состоит из схем трех последовательностей, объединенных между собой многополюсниками  $P$ ,  $Q$  и  $R$ . Многополюсники  $P$  и  $Q$  включены по краям линии, чтобы создавать условия разрыва фазы в местах их включения. В промежуточной точке линии подключен многополюсник  $R$ , предназначенный для создания условий КЗ. Изменяя соотношение сопротивлений  $Z'_n$  и  $Z_n - Z'_n$ , можно перемещать место КЗ вдоль линии. Пунктиром в схеме показана возможность учета обходных связей и учета взаимной индукции линии с элементами обходной связи.

Количество многополюсников несимметрии в одной расчетной схеме может быть неограниченным, причем эти многополюсники не влияют друг на друга. Общий случай структуры многополюсника рассмотрен в [27]. Здесь остановимся лишь на его эквивалентной схеме в случае

При расчетах принималось, что КЗ происходит в начале линии через  $R_n=30$  Ом.

По данным табл. 8 можно считать, что при  $K=2,5$  на передающей стороне линии имеется опасность неселективного срабатывания реле фазы В, на приемной — реле фазы С. При снижении  $K$  условия функционирования РС двух фаз выравниваются и вообще опасность срабатывания РС неповрежденных фаз уменьшается.

Таблица 8

Диапазон изменения $\delta$ , град	Число срабатываний РС на 1000 испытаний			
	$K=2,5$		$K=0$	
	РС фазы В	РС фазы С	РС фазы В	РС фазы С
0÷50	0	27	0	0
50÷75	0	625	7	8
75÷90	11	949	166	139
0÷-50	3	0	0	0
-50÷-75	270	0	2	7
-75÷-90	782	2	57	159

Сравнение рис. 35 с рис. 32, а табл. 8 с табл. 5 приводит к выводу, что при равных углах между ЭДС каскадный режим по рис. 31,б значительно тяжелее неполнофазного режима. Несколько облегчает положение лишь то, что сами углы между ЭДС при каскадном отключении должны иметь меньшие значения, поскольку к моменту полного отключения фазы качания между системами еще не успевают развиваться как из-за кратковременности существования КЗ, так и из-за наличия большого переходного сопротивления (следует полагать, что однофазное КЗ через значительное переходное сопротивление не должно вызывать большого возмущения в системе).

**Каскадное отключение однофазного КЗ с удаленного конца линии (рис. 31,е).** В рассматриваемом режиме интерес представляют сопротивления на зажимах РС всех трех фаз. Реле сопротивления неповрежденных фаз не должны работать, РС поврежденной фазы должно обеспечивать большую чувствительность к переходным сопротивлениям. Тогда оно обеспечит каскадное отключение КЗ, а при повторном включении на неустранившееся КЗ — отключение линии всеми тремя фазами. Высокая чувствительность РС поврежденной фазы обеспечивается исчезновением подпитки КЗ по поврежденной фазе от системы удаленного конца линии.

На рис. 36 показано расположение сопротивлений на зажимах РС в рассматриваемом режиме при КЗ фазы А на расстоянии от 0,2 до 1 длины линии с параметрами схемы рис. 6. Для металлических КЗ рассмотрены случаи  $\dot{E}_2 = \dot{E}_1$ ,  $\dot{E}_2 = \dot{E}_1 e^{j60^\circ}$ ,  $\dot{E}_2 = \dot{E}_1 e^{-j60^\circ}$ . Для КЗ через  $R_n$  — только случай  $\dot{E}_2 = \dot{E}_1$ .

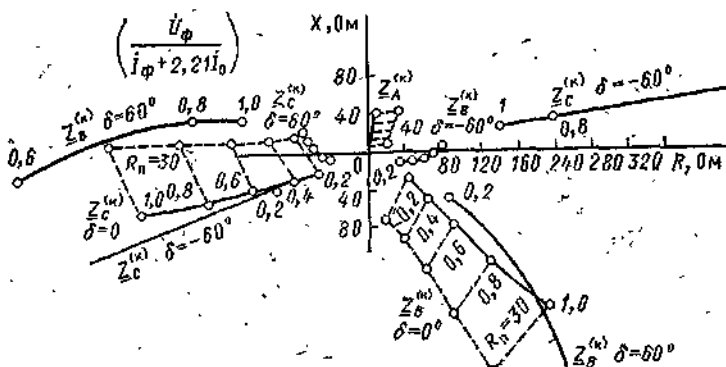


Рис. 36. Сопротивления на зажимах РС ИО при каскадном отключении КЗ по схеме рис. 31,б:

—  $R_n=0$ ; - - - -  $R_n=30 \text{ Ом}$

Расположение на диаграмме значений  $\underline{Z}_A^{(k)}$  подтверждает возможность получения высокой чувствительности РС поврежденной фазы к переходным сопротивлениям.

Области расположения  $\underline{Z}_B^{(k)}$  и  $\underline{Z}_C^{(k)}$  целесообразно сравнить с сопротивлениями на зажимах РС в тех же условиях (см. рис. 34), но до отключения фазы с противоположной стороны линии. Сравнение показывает, что после отключения фазы характер сопротивлений на зажимах реле фаз В и С остается прежним, но все сопротивления несколько удаляются от оси сопротивления линии, т. е. на данной передаче режим каскада по рис. 31,б с точки зрения селективности несрабатывания РС неповрежденных фаз более легкий, чем режим однофазного КЗ.

Результаты статистических испытаний режима каскадного отключения КЗ приведены в табл. 9. Рассчитывались КЗ в середине и в конце линии через сопротивление 30 Ом, коэффициент  $K$  равен 2,5, характеристика РС — окружность с центром в точке  $\underline{Z}_{1л}$  и с радиусом  $1,1Z_{1л}$ .

В табл. 9 отражена статистика работы реле всех трех фаз. При этом чувствительность РС поврежденной фазы



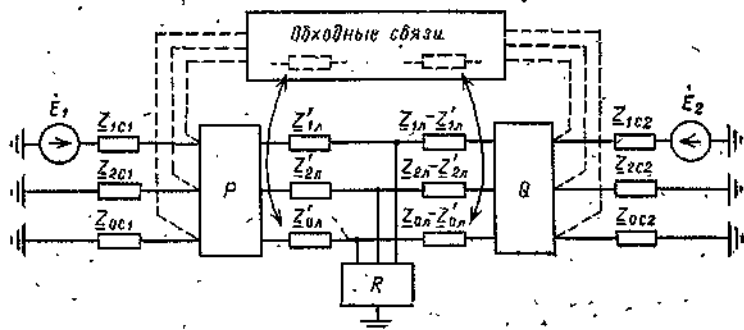


Рис. 37. Расчетная схема электропередачи с использованием многополюсников несимметрии

несимметрии с особой фазой  $A$ . Эквивалентные схемы, приведенные на рис. 38, охватывают все режимы несимметрии, которые необходимо просчитывать при выборе уставок РС устройства ОАПВ: рис. 38,а — симметричный режим; рис. 38,б — разрыв фазы  $A$  при наличии в фазах  $B$  и  $C$  сопротивлений  $Z$ ; рис. 38,в — КЗ фазы  $A$  через  $R_n$ ; рис. 38,г — КЗ фаз  $BC$  на землю через равные фазные и общее переходное сопротивление.

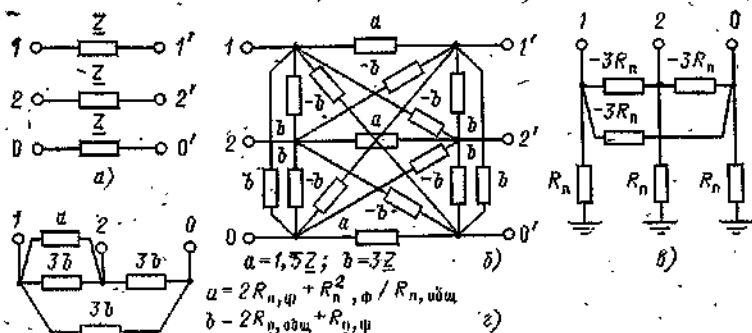


Рис. 38. Эквивалентные схемы многополюсников несимметрии с особой фазой  $A$

После расчета сопротивлений на зажимах РС во всех интересующих режимах следует подобрать характеристику реле так, чтобы она обеспечила все требования к органу выбора фазы. Подбор возможен либо графически, либо с помощью ЭВМ. Структура специальной программы, обеспечивающей подбор характеристики в виде двух пересекающихся окружностей, дана в [28]. Программа определяет уставки и коэффициенты смещения обеих окружностей, проверяет надежность

их взаимного перекрытия, чувствительность суммарной характеристики к КЗ через переходное сопротивление. Вопрос надежности взаимного перекрытия двух характеристик с разными коэффициентами компенсации по току нулевой последовательности рассмотрен в [5].

Подбор характеристик РС на сильно нагруженных линиях сложен, а иногда и невозможен. В таких случаях обеспечение выбора фазы идет за счет отказа от выполнения ИО отдельных функций.

С самого начала внедрения дистанционных ИО стало ясно, что они не могут во всех случаях обеспечить необходимую чувствительность к переходным сопротивлениям при КЗ в полнофазном режиме. Пришлось ориентироваться на допустимость каскадного отключения поврежденной фазы, что и было учтено в логической части устройств ОАПВ-3, ОАПВ-400 и в последующих разработках.

На линиях с большой нагрузкой часто невозможно обеспечить несрабатывание РС, оставшихся в работе в неполнофазном режиме фаз. В этом случае приходится отказываться от выполнения РС функции защиты линии в неполнофазном режиме. Одновременно РС теряют способность отключать поврежденную фазу после ее неуспешного повторного включения. Для устранения этого недостатка применяют схему, в которой при включении от АПВ, кратковременно вводится в действие на отключение только РС поврежденной фазы. Возможен также кратковременный ввод высокочувствительного токового реле, включенного на ток этой фазы. Такие реле выводятся из действия немедленно после успешного повторного включения фазы с двух сторон. Контроль факта успешного повторного включения производится по исчезновению на линии напряжения нулевой последовательности.

Затруднения с обеспечением селективности РС неповрежденных фаз при близких однофазных КЗ преодолеваются либо применением РС со сложными формами характеристики, либо применением комбинации из нескольких реле. В работах П. К. Фейста рассмотрены варианты, когда характеристика РС ИО имеет смещение в первый квадрант плоскости сопротивлений, а выбор фазы при КЗ в начале линии обеспечивается либо тремя дополнительными токовыми реле, включенными на токи фаз, либо тремя реле напряжения, включенными на фазные напряжения, либо тремя дополнительными РС, не имеющими компенсации по току нулевой последовательности.

Последний вариант получил свое полное развитие в двухэлементных РС, используемых в настоящее время в панелях ОАПВ. Комбинация из двух окружностей и обеспечивает характеристику, вытянутую вдоль оси сопротивления линии, и облегчает обеспечение селективности при близких КЗ за счет снижения коэффициента компенсации по току  $I_0$  у элемента, образующего нижнюю окружность. В [26] предлагалось также в некоторых случаях выводить из действия во время неполнофазного режима лишь один из элементов, оставляя второй для защиты хотя бы части линии.

Очевидна неполнота, частичность перечисленных технических решений. Поэтому появляются предложения освободить РС ИО от части функций, переложив их на другие устройства. Примером является предложение [29] об установке специальной защиты, вводимой в действие лишь на время неполнофазного режима цикла ОАПВ. В качестве такой защиты предлагается реле, сравнивающее абсолютные значения токов двух оставшихся в работе фаз, т. е. условие срабатывания защиты имеет вид

$$I_B/I_C \geq m \text{ или } I_C/I_B \geq m.$$

Известно, что токи двух оставшихся в работе в неполнофазном режиме фаз равны по абсолютным значениям при условии, что  $\arg Z_{22} = \arg Z_{00}$ . Реально равенство углов  $Z_{22}$  и  $Z_{00}$  не выдерживается как из-за наличия активных составляющих сопротивлений эквивалентных систем в схеме обратной последовательности, так и из-за наличия активных составляющих сопротивления линии в схеме нулевой последовательности. Поэтому коэффициент  $m$  следует принимать не ниже 1,2—1,3. Но и при таком значении  $m$  защита оказывается достаточно чувствительной к КЗ на оставшихся в работе в цикле ОАПВ фазах. Недостатком рассмотренного способа следует считать нерешенность вопроса об отключении фазы после неуспешного ОАПВ.

Описанное в § 8 сочетание фильтрового органа выбора особой фазы с РС, включенным на междуфазное напряжение и разность фазных токов, также не решает вопрос о защите оставшихся в работе фаз и об отключении фазы после неуспешного ОАПВ.

Представляется, что более целесообразно сочетание фильтрового органа выбора особой фазы с тремя РС, включенными на отношение  $U_\phi$  к  $(I_\phi + KI_0)$ . Фильтровый орган обеспечит отключение поврежденной фазы при однофазном КЗ и неповрежденной при КЗ двух фаз на землю. Реле сопротивления обеспечат и отключение двух оставшихся фаз при КЗ двух фаз на землю, и защиту оставшихся в работе фаз в неполнофазном режиме цикла ОАПВ, и защиту фазы после ее неуспешного повторного включения. К характеристике РС не будет предъявляться требование высокой чувствительности к переходным сопротивлениям. Характеристику можно будет принять достаточно узкой. Это значительно облегчит отстройку от срабатывания РС в послеаварийном режиме и в режиме каскадного отключения.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ПРИНЦИПА ДЛЯ ОДНОСТОРОННЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА КЗ

#### 11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА КЗ НА ОСНОВЕ ФИКСАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА НА ОДНОЙ СТОРОНЕ ЛИНИИ

Устройства для определения расстояния до места КЗ (устройства ОМП — определения места повреждения) получили в энергосистемах СССР широкое распространение, поскольку они существенно снижают время отыскания повреждения на линии и время отключенного состояния линии после КЗ [12]. Имеется большое число работ, посвященных как принципам определения расстояния на основе двусторонней фиксации электрических величин, так и разработке аппаратуры для двусторонних замеров. Принципы одностороннего определения места повреждения (ООМП) исследованы в меньшей степени.

Между тем есть основания ожидать, что с внедрением в эксплуатацию устройств, включающих элементы вычислительной техники, область применения одностороннего замера может существенно вырасти. Двусторонний замер требует передачи информации о показаниях приборов с одного конца линии на другой для производства последующих вычислений. Организация процесса обмена информацией (например, с использованием каналов телемеханики) является дорогим и сложным мероприятием. Двусторонний замер часто является менее надежным, поскольку два устройства одностороннего замера работают независимо и взаимно дублируются, а при ошибочной работе одного из устройств двустороннего замера трудно обнаружить и устранить ошибки результатов последующих вычислений.

Односторонний замер при выполнении на релейной элементной базе требует гораздо более сложной аппаратуры, чем двусторонний. Однако при использовании ЭВМ для выполнения функций релейной защиты алгоритм ООМП может обрабатываться тем же процессором, который во время КЗ должен обрабатывать алгоритм защиты: исходные электрические величины и принцип у этих двух алгоритмов могут быть весьма близкими.

Основными препятствиями к распространению устройств ООМП в настоящее время являются: относительная слож-

ность самих устройств; сложность устранения влияния переходного сопротивления в месте повреждения; недостаточный уровень исследования многих теоретических вопросов.

Принципы ООМП близки к принципам дистанционной защиты. Это объясняется идентичностью задач, решаемых защитой и ООМП: устройства защиты сравнивают расстояние до места КЗ с заранее принятой длиной зоны; устройства ООМП должны выразить это расстояние в мерах длины. Но есть и существенные различия. К защите предъявляются жесткие требования по быстродействию и устойчивости функционирования, что заставляет идти на применение более простых принципов и устройств, иногда в ущерб другим качествам защиты. В частности, ограничение области действия дистанционного реле характерной определенной формы предполагает допустимость недействия защиты при КЗ через значительные переходные сопротивления. В ООМП требование быстроты выдачи результата несущественно, но появляется необходимость в более точном определении расстояния при КЗ по всей длине линии.

Дистанционный принцип в чистом виде обеспечивает соответствие между сопротивлением на зажимах реле  $\underline{Z}$  и сопротивлением линии до места КЗ  $\underline{Z}_{\text{ЛК}}$  лишь при металлических КЗ. При наличии  $R_{\text{п}}$  сопротивление  $\underline{Z}$  может существенно отличаться от  $\underline{Z}_{\text{ЛК}}$ , что иллюстрируется рис. 13, 14, 15, 17 и формулами (16), (17). Величина и направление вектора  $\Delta \underline{Z} = \underline{Z} - \underline{Z}_{\text{ЛК}}$  в сильной степени зависят от значения  $R_{\text{п}}$  и от характера токов нагрузочного режима.

Рассмотрим, какую информацию о  $\underline{Z}_{\text{ЛК}}$  можно извлечь из замеров, производимых на одном конце линии.

Первые предложения по использованию дистанционного принципа для ООМП (например, устройства, разработанные А. Н. Висящевым или Я. М. Вакаром) предполагали фиксацию абсолютного значения полного сопротивления на зажимах реле  $|\underline{Z}|$ . Непосредственно из примеров рис. 13—17 ясно, что фиксация абсолютного значения  $|\underline{Z}|$  дает приемлемые результаты лишь при полном отсутствии переходного сопротивления.

Более совершенна фиксация реактивной составляющей сопротивления  $\underline{Z}$ , используемая в выпускаемых промышленностью приборах типа ФИС. Из рис. 15, а следует, что при отсутствии составляющих нагрузочного режима (на линии с односторонним питанием или на линии с двусторон-

ним питанием при  $E_1 = E_2$ ) реактивная составляющая  $X = \text{Im } Z$  близка к реактивной составляющей сопротивления до места КЗ  $X_{\text{ик}}$ . Но все же замер при КЗ в начале линии несколько увеличен, а при КЗ в конце уменьшен из-за комплексности коэффициентов токораспределения  $C$  в схемах различных последовательностей, определяемых по (18а). Несмотря на малые значения угла  $\alpha$  на рис. 15,а при значительных  $R_n$  погрешности замера даже при одностороннем питании могут быть большими. Конкретные расчеты, проведенные для линий 110 кВ с односторонним питанием, показали, что фиксация реактивной составляющей сопротивления при  $R_n = 30$  Ом дает погрешность от 5 до 25% длины линии.

Неприемлемость фиксации реактивной составляющей  $Z$  на линиях с двусторонним питанием очевидна. Рассмотрим возможности более строгого подхода к устранению влияния переходного сопротивления. Исследование проводится для простейшего случая — линия с двусторонним питанием без обходных связей (см. рис. 5). Кроме того, приняты допущения:

а) переходное сопротивление является линейным и чисто активным;

б) отсутствуют или отфильтрованы апериодические и высшие гармонические составляющие в токах и напряжениях;

в) известны параметры линии и эквивалентных систем в схеме нулевой последовательности (для устройств, работающих при КЗ на землю) или в схеме обратной последовательности (для устройств, работающих при двухфазных КЗ без земли).

Некоторые из принятых допущений в реальных условиях соблюдаются недостаточно строго. Например, одна из составляющих переходного сопротивления при КЗ на землю (сопротивление дуги) является нелинейной, как и сопротивление тросов, учитываемое при их многократном заземлении. Но указанные сопротивления составляют лишь небольшую часть общего значения переходного сопротивления. Можно предположить, что представление о переходном сопротивлении как о линейном и активном не должно привести к большим погрешностям.

Устранение погрешностей от наличия в электрических величинах апериодических или высших гармонических составляющих должно составлять предмет отдельного исследования. Укажем лишь, что данный вопрос возникает при любых методах защиты и ООМП и известны пути устра-

нения или снижения влияния переходных процессов. Например, производство замера с небольшим замедлением (два-три периода в сетях 110—220 кВ), применение аналоговой или цифровой фильтрации измеряемых величин, применение схем и способов, принципиально устраняющих влияние апериодических составляющих, и т. д. Отметим, что для ООМП принципиально возможна лучшая фильтрация свободных составляющих, чем для защиты, так как устройства ООМП могут работать гораздо медленнее защит. Кроме того, интенсивность переходных процессов при КЗ на землю менее значительна, чем при междуфазных КЗ.

Предположение об известности параметров систем в схемах нулевой или обратной последовательности наименее обоснованно. Если параметры линии можно достаточно точно сосчитать или измерить, а параметры прилегающей системы  $Z_{0c1}$  или  $Z_{2c1}$  можно определить по отношению напряжения и тока на данном конце линии, то параметрами системы противоположного конца линии приходится задаваться заранее. Возможны непредвиденные изменения параметров системы  $C2$ . Значение  $Z_{0c2}$  может меняться из-за переключений в системе  $C2$  или из-за изменения сопротивлений трансформаторов при действии регуляторов напряжения на них. Значение  $Z_{2c2}$  может меняться из-за переключений в системе или в составе нагрузки  $C2$ , т. е. всегда возможно определенное несоответствие между расчетными и действительными параметрами  $C2$ . Поэтому метод ООМП должен быть мало критичен к возможным отклонениям параметров системы противоположного конца линии.

С учетом перечисленных допущений рассмотрим возможность расчета сопротивления (расстояния) до места однофазного КЗ. На основании выражения (16) сопротивление на зажимах устройства ООМП равно:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_{1к} + \frac{3R_n I_{0к}}{I_\phi + K I_0} = \underline{Z}_{1к} + \underline{\Delta Z},$$

т. е. состоит из сопротивления линии  $Z_{1к}$  и вектора  $\underline{\Delta Z}$ . При активном характере  $R_n$  вектор  $\underline{\Delta Z}$  на комплексной плоскости образует с горизонталью угол  $\arg[I_{0к}/(I_\phi + K I_0)]$ , который не может быть измерен на одном конце линий, поскольку фаза тока  $I_{0к}$  неизвестна. Однако известна фаза тока  $I_0$ , отличие которой от фазы  $I_{0к}$  невелико.

Поэтому представим угол вектора  $\Delta \underline{Z}$  в виде:

$$\arg \frac{I_{0к}}{I_{\phi} + KI_0} = \arg \frac{I_0}{I_{\phi} + KI_0} + \arg \frac{I_{0к}}{I_0} = \alpha - \beta, \quad (34)$$

где

$$\alpha = \arg [I_0 / (I_{\phi} + KI_0)]; \quad (35)$$

$$\beta = \arg [I_0 / I_{0к}] = \arg C_{ор}. \quad (36)$$

При известных углах  $\alpha$  и  $\beta$  определение  $Z_{1к}$  можно произвести графически, если при КЗ фиксировать активную и реактивную составляющие  $\underline{Z}$  — величины  $R$  и  $X$ . Построение показано на рис. 39: через конец вектора  $\underline{Z} = R + jX$  следует провести прямую под углом  $\alpha - \beta$  к горизонтали.

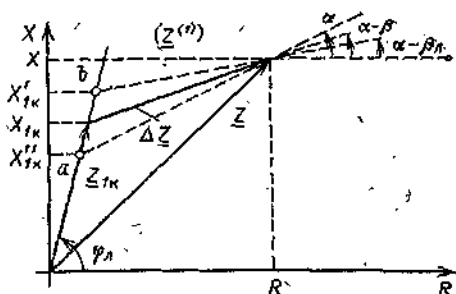


Рис. 39. Графическое определение реактивной составляющей сопротивления до места КЗ

Пересечение прямой с осью сопротивления линии дает величину  $Z_{1к}$ . Аналитическая формула для определения реактивной составляющей сопротивления прямой последовательности до места КЗ может быть найдена после решения треугольника, образованного векторами  $\underline{Z}$ ,  $\underline{Z}_{1к}$  и  $\Delta \underline{Z}$  в виде:

$$X_{1к} = \frac{X - R \operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg} \varphi_L - \operatorname{tg}(\alpha - \beta)} \operatorname{tg} \varphi_L. \quad (37)$$

где  $\varphi_L$  — угол сопротивления линии в схеме прямой последовательности ( $\operatorname{tg} \varphi_L = X_L / R_L$ ).

Та же формула может быть записана проще, если на рис. 39 произвести поворот осей координат на угол  $(90^\circ - \varphi_L)$ , чтобы ось реактивных сопротивлений совпала с осью сопротивления линии:

$$|Z_{1к}| = X' - R' \operatorname{tg}(90^\circ - \varphi_L + \alpha - \beta), \quad (38)$$

где  $X'$  и  $R'$  — составляющие сопротивления  $\underline{Z} e^{j(90^\circ - \varphi_L)}$ .

Расчет по выражению (37) или (38) мог бы полностью исключить влияние на замер наличия переходного сопротивления при любых углах между ЭДС эквивалентных си-



стем. Но в эти выражения входят углы  $\alpha$  и  $\beta$ , из которых лишь один  $\alpha$  может быть измерен на данном конце линии при КЗ, а измерение угла  $\beta$  невозможно.

Появление угла  $\beta$  объясняется комплексностью коэффициента токораспределения в схеме нулевой последовательности  $\underline{C}_{0p}$ . Комплексность возникает из-за неравенства между собой углов сопротивлений линии и систем в схеме нулевой последовательности. Сопротивления систем обычно почти индуктивны, поскольку определяются в основном сопротивлениями трансформаторов с заземленными нейтралью. Сопротивления линий имеют значительную активную составляющую из-за активных сопротивлений фазных проводов и земли. Из формулы приложения III  $\underline{C}_{0p} = (Z_{00} - Z_{0c} - Z_{0k}) / Z_{00}$  можно получить аналитическое выражение для значения угла  $\beta$ :

$$\beta = \arctg \frac{X_{0c2} + X_{0l} - X_{0k}}{R_{0c2} + R_{0l} - R_{0k}} - \arctg \frac{X_{00}}{R_{00}}, \quad (39)$$

откуда следует, что значение  $\beta$  зависит от места КЗ и от параметров всей схемы нулевой последовательности. О значении этого угла можно судить по рис. 40, на котором показана зависимость  $\beta$  от места КЗ на линии. Кривые соответствуют довольно широкому диапазону соотношения сопротивлений линии и систем. При расчете кривых принято, что сопротивление систем имеет чисто индуктивный характер, а сопротивление линии имеет угол в  $78^\circ$ . При КЗ в начале линии угол  $\beta$  всегда отрицателен. При КЗ в конце линии — положителен. Переход угла через нулевое значение происходит в точке, расположенной ближе к шинам системы, имеющей меньшее сопротивление в схеме нулевой последовательности. Максимальное положительное значение угла

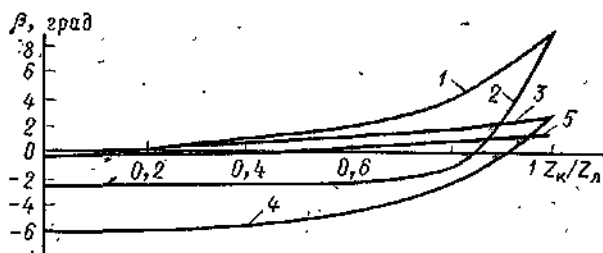


Рис. 40. Зависимость значения угла  $\beta$  от расстояния до точки КЗ:  $Z_{0l} = 35e^{j78^\circ}$  Ом; 1 —  $Z_{0c1} = j1$  Ом,  $Z_{0c2} = j10$  Ом; 2 —  $Z_{0c1} = j10$  Ом,  $Z_{0c2} = j1$  Ом; 3 —  $Z_{0c1} = j10$  Ом,  $Z_{0c2} = j100$  Ом; 4 —  $Z_{0c1} = j100$  Ом,  $Z_{0c2} = j10$  Ом; 5 —  $Z_{0c1} = j100$  Ом,  $Z_{0c2} = j100$  Ом

$\beta$  имеет место при условии  $Z_{0л} \gg X_{0с1} + X_{0с2}$  и равно  $90^\circ - \arg Z_{0л}$ . На линиях 220 кВ и выше  $\arg Z_{0л}$  равен  $75-80^\circ$ , т. е. угол  $\beta$  может достигать  $15-10^\circ$ . На линиях 110 кВ с малым сечением проводов и заземленными тросами угол  $\beta$  может быть еще больше.

В [30] предложены два способа упрощенного решения уравнения (37). Первый из них — решение, основанное на пренебрежении углом  $\beta$ , как достаточно малым:

$$X'_{1к} = \frac{X - R \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \varphi_{л} - \operatorname{tg} \alpha} \operatorname{tg} \varphi_{л} \quad (40)$$

Второй способ — решение в предположении, что угол  $\beta$  всегда равен своему максимальному положительному значению  $\beta_{л}$ , существующему при КЗ в конце линии:

$$X'_{1к} = \frac{X - R \operatorname{tg}(\alpha - \beta_{л})}{\operatorname{tg} \varphi_{л} - \operatorname{tg}(\alpha - \beta_{л})} \operatorname{tg} \varphi_{л} \quad (41)$$

Оба решения требуют фиксации на данном конце линии трех электрических величин:  $R = \operatorname{Re}[\dot{U}_{\phi}/\dot{I}_{\phi} + K\dot{I}_0]$ ,

$$X = \operatorname{Im}[\dot{U}_{\phi}/(\dot{I}_{\phi} + K\dot{I}_0)], \quad \alpha = \arg[\dot{I}_0/(\dot{I}_{\phi} + K\dot{I}_0)].$$

Остальные входящие в формулы величины известны заранее. Оба решения дают не точное, а примерное значение  $X_{1к}$ . Графический смысл решений пояснен на рис. 39, где через конец вектора  $\underline{Z}$  проведены пунктирные прямые под углом  $\alpha$  и  $\alpha - \beta_{л}$  к горизонтали. Пересечение этих прямых с осью сопротивления линии дает точки  $a$  и  $b$ , ординаты которых и равны  $X''_{1к}$  и  $X'_{1к}$ . В рассматриваемом случае значение  $X''_{1к}$  занижено,  $X'_{1к}$  завышено по сравнению с  $X_{1к}$ .

Погрешность, получаемая при вычислении сопротивления по (40) или (41), может быть оценена на примере устройства ООМП, установленного на передаче, схема которой приведена на рис. 6. Результаты соответствующих расчетов показаны на рис. 41. Рассматривались КЗ через переходное сопротивление в 30 Ом в различных точках вдоль линии при различных значениях угла между ЭДС  $\delta$ . Для каждого КЗ производился расчет  $X_{расч}$  по (40) (пунктирная линия) и по (41) (сплошная линия) и определялась приведенная погрешность по формуле  $\sigma = (X_{1к} - X_{расч})/X_{1к}$ . Положительные погрешности соответствуют заниженному результату расчета.

Из рис. 41 следует, что погрешность от предположения  $\beta = 0$  резко возрастает при удалении точки КЗ и сильно зависит от угла между ЭДС эквивалентных систем. На передающем конце линии ( $\delta < 0$ ) погрешности от

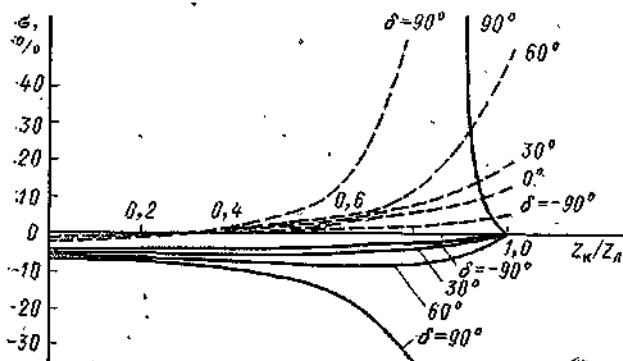


Рис. 41. Погрешности ООМП по выражениям (40) и (41) при КЗ на линии рис. 6

носительно невелики, на приемном — весьма большие. Например, при  $\delta=90^\circ$  и  $Z_k > 0,8Z_n$  погрешность стремится к  $\infty$ .

При предположении  $\beta=\beta_n$  удается обеспечить точные результаты при КЗ в конце линии при любом угле между ЭДС. Но при КЗ в промежуточных точках линии имеется погрешность до 10% при  $\delta < 60^\circ$  и до  $\pm\infty$  при  $\delta=90^\circ$ . Однако значения погрешности при расчете с  $\beta=\beta_n$ , как правило, меньше, чем при расчете с  $\beta=0$ .

Отметим, что в [31] для способа ООМП, дающего те же результаты (см. § 12), было предложено определять  $X_{1k}$  в предположении  $\beta=2-3^\circ$ . Однако расчеты не показывают преимуществ такого решения перед уже рассмотренными.

Погрешности расчета по (40) и (41) удобно анализировать на комплексной плоскости сопротивлений. Для пояснения на рис. 42 рассмотрено КЗ в точке с сопротивлением  $Z_{1k}$ . Поставим задачу определить, при каких значениях  $\Delta Z$  ошибки в расчете реактивного сопротивления по (40) не превосходят заранее заданной величины  $\Delta X$ . Для

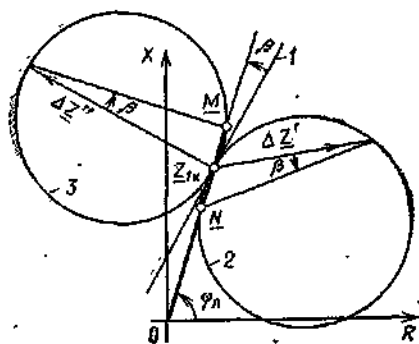


Рис. 42. Графический анализ погрешностей ООМП по выражению (40)

этого найдем точки  $M$  и  $N$ , реактивные сопротивления до которых равны  $X_{1к} + \Delta X$  и  $X_{1к} - \Delta X$ . Допустим, что угол  $\beta > 0$ . Построим окружность 2 как геометрическое место вершин одинаковых углов  $\beta$ , опирающихся на отрезок  $NZ_{1к}$ . Можно показать, что любому вектору  $\Delta Z'$ , конец которого лежит на окружности 2, соответствует ошибка в вычислении по (40), равная  $-\Delta X$ . Для этого достаточно, как это уже делалось на рис. 39, провести через точку конца вектора  $\Delta Z'$  прямую под углом  $\alpha$  к горизонтали, т. е. под углом  $\beta$  к вектору  $\Delta Z'$ . Прямая пересечет ось сопротивления линии в точке  $N$ , т. е. результат вычисления по (40) равен  $X_{1к} - \Delta X$ . Следовательно, окружность 2 является граничной линией, соответствующей ошибке вычисления в  $-\Delta X$ . Точно так же окружность 3 является граничной линией, соответствующей ошибке в  $+\Delta X$ . Если конец вектора  $Z$  попадет внутрь окружностей 2 или 3, то ошибка расчета по (40) не превзойдет  $\pm \Delta X$ .

Весьма важной граничной линией является прямая 1, проходящая через точку  $Z_{1к}$  под углом  $\beta$  к оси сопротивления линии. Всем точкам, лежащим правее этой прямой, соответствует уменьшенный замер реактивного сопротивления по выражению (40). Всем точкам слева от прямой 1 соответствует увеличенный замер. Если конец вектора  $Z$  расположен на прямой 1, то расчет по (40) неприменим, так как знаменатель формулы при этом обращается в ноль.

Теперь можно объяснить характер пунктирных кривых  $\sigma = f(Z_k/Z_n)$ , изображенных на рис. 41. Погрешности устройств, установленных на передающем конце линии ( $\delta < 0$ ), незначительны из-за малости и благоприятного расположения в первом квадранте плоскости сопротивления самих векторов  $\Delta Z$  (см. рис. 13). На приемном конце линии векторы  $\Delta Z$  велики и расположены неблагоприятно — с ростом  $R_k$  конец вектора  $\Delta Z$  перемещается из первого во второй квадрант плоскости. Если конец вектора  $\Delta Z$  (см. рис. 42) перемещается во второй квадрант, он пересекает прямую 1, на которой погрешность расчета бесконечна, что и нашло отражение на рис. 41.

Идентично можно с помощью характеристик анализировать погрешности расчета по формуле (41). Следует лишь учесть, что при КЗ по всей длине линии погрешность определяется отрицательным углом  $\beta - \beta_n$ . Поэтому характеристики строятся так же, как и на рис. 42, но следует везде угол  $\beta$  заменить на угол  $\beta - \beta_n$ .

Характеристики рис. 42 изображены для одной точки КЗ. Поскольку значение  $\beta$  зависит от расстояния до КЗ, характеристики должны непрерывно изменяться при перемещении точки КЗ вдоль линии. С удалением точки КЗ угол  $\beta$  увеличивается, т. е. окружности 2 и 3 на рис. 42 при расчете по (40) уменьшают свои размеры, а погрешности расчета растут. Если же расчет производится по (41), то с удалением точки КЗ разность углов  $\beta - \beta_d$  уменьшается, окружности 2 и 3 увеличиваются, а погрешности вычислений падают. При КЗ в точке конца линии погрешность расчета по (40) максимальна, а погрешность расчета по (41) должна исчезнуть.

Отметим, что реальные значения углов  $\beta$  и  $\beta - \beta_d$  невелики, т. е. окружности 2 и 3 на рис. 42 имеют гораздо большие размеры, чем показано.

Для более четкого представления о применимости формул (40) и (41) для целей ООМП были проведены статистические расчеты погрешности определения сопротивления до места КЗ по этим формулам. Методика статистических испытаний пояснена в § 9. Диапазоны изменения параметров передачи 220 кВ принимались по табл. 4. Переходные сопротивления считались равномерно распределенными в диапазоне от 0 до 10 Ом. Для каждого расстояния до места КЗ и для каждого диапазона углов между ЭДС проводилась 1000 расчетов электрических величин с последующим определением  $X_{ik \text{ расч}}$  по (40) и по (41). Каждый раз определялась приведенная погрешность  $\sigma\% = 100(X_{ik} - X_{ik \text{ расч}})/X_{ik}$ . Затем из результатов всех 1000 испытаний определялась среднеквадратическая погрешность  $\sigma_{sk} = \sqrt{2\sigma_i^2/1000}$ . При расчетах по (41) дополнительно учитывалась возможность ошибки в определении  $\beta_d$  из-за изменения значения сопротивления системы удаленного конца линии. Принималось, что при расчете  $\beta_d$  значение  $X_{0с2 \text{ расч}}$  может в 1,5 раза отличаться от действительного  $X_{0с2}$ , т. е.  $X_{0с2 \text{ расч}}$  получалось отдельно от генератора случайных чисел и считалось равномерно распределенным в диапазоне от  $X_{0с2}/1,5$  до  $1,5X_{0с2}$ .

Результаты расчетов сильно различаются в зависимости от того, на передающем или на приемном конце линии установлено устройство ООМП. В частности, если устройство установлено на передающем конце линии (углы  $\delta$  равномерно распределены в диапазоне от 0 до  $90^\circ$ ), то при КЗ в точках, удаленных на 20, 40, 60, 80 и 100% полной длины линии среднеквадратическая погрешность определения расстояния равна:

при расчете по (40): 0,2; 0,2; 0,4; 1,1; 7,1%;

при расчете по (41): 1,8; 2; 2,4; 3; 0,3%.

Если устройство ООМП установлено на приемном конце линии, то возможны бесконечно большие ошибки, лишające всякого смысла понятие среднеквадратической погрешности. Определенной характеристи-

кой может служить относительная частота появления заданной погрешности — число испытаний (из 1000), при которых погрешность превысила заданную. Цифры, характеризующие относительную частоту появления погрешности, большей 5, 10 и 50%, сведены в табл. 10. При расчете принималось, что угол между ЭДС  $\delta$  изменяется в пределах от  $+30^\circ$  до  $+90^\circ$ .

Таблица 10

$Z_{1K}/Z_{1Л}$	Число испытаний, при которых погрешность расчета по (40) превышает, %			Число испытаний, при которых погрешность расчета по (41) превышает, %		
	5	10	50	5	10	50
0,2	0	0	0	26	0	0
0,4	0	0	0	70	3	0
0,6	3	1	0	168	27	0
0,8	105	40	7	303	114	14
1	783	620	190	44	24	6

Все сказанное заставляет весьма осторожно подходить к возможности ООМП на основе расчетов по выражениям (40) и (41), особенно на приемном конце одиночных нагруженных линий.

Возможность существенных погрешностей при ООМП с примерным заданием угла  $\beta$  заставляет искать пути более точного решения уравнения (37). Такой путь показан в [30] — это совместное решение уравнений (37) и (39) относительно  $X_{1K}$ . После подстановки (39) в (37) и ряда преобразований можно прийти к квадратному уравнению:

$$aX_{1K}^2 + bX_{1K} + c = 0, \quad (42)$$

в котором

$$a = \frac{R_{1Л}}{X_{1Л}} \left[ \frac{X_{0Л}}{R_{1Л}} - \frac{R_{0Л}}{X_{1Л}} + \left( \frac{X_{0Л}}{X_{1Л}} + \frac{R_{0Л}}{R_{1Л}} \right) T \right], \quad (43)$$

$$b = \frac{R_{1Л}}{X_{1Л}} \left[ R_{0с2} + R_{0Л} + R \frac{R_{0Л}}{R_{1Л}} - X \frac{X_{0Л}}{R_{1Л}} - (X_{0с2} + X_{0Л}) \frac{X_{1Л}}{R_{1Л}} - \right. \\ \left. - (X_{0с2} + X_{0Л} + R \frac{X_{0Л}}{R_{1Л}} + X \frac{R_{0Л}}{R_{1Л}} + (R_{0Л} + R_{0с2}) \frac{X_{1Л}}{R_{1Л}}) T \right]; \quad (44)$$

$$c = X(X_{0с2} + X_{0Л}) - R(R_{0Л} + R_{0с2}) + \\ + [R(X_{0с2} + X_{0Л}) + X(R_{0Л} + R_{0с2})] T; \quad (45)$$

$$T = \frac{BR_{00} - AX_{00}}{AR_{00} + BX_{00}}; \quad (46)$$

$$A = \operatorname{Im} \frac{I_0}{I_\Phi + KI_0}; \quad (47)$$

$$B = \operatorname{Re} \frac{I_0}{I_\Phi + KI_0}. \quad (48)$$

Один из корней уравнения (42) должен давать точное значение реактивной составляющей сопротивления линии до места КЗ. Однако уже само наличие двух корней создает известные неудобства.

Рассмотрим свойства корней уравнения (42) в предположении точной фиксации во время КЗ величин  $R$ ,  $X$ ,  $A$  и  $B$  (отметим, что фиксация величин  $A$  и  $B$  эквивалентна фиксации угла  $\alpha$ , поскольку  $\operatorname{tg} \alpha = A/B$ ) и точного знания схемы нулевой последовательности. При указанных условиях один из корней правильный, т. е. положительный и

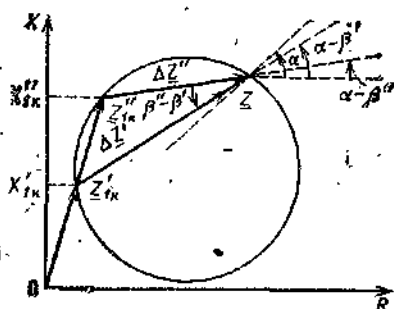


Рис. 43. Графическая интерпретация получения двух корней уравнения (42), лежащих в пределах линии

лежит в пределах линии. Второй корень может либо лежать за пределами линии (быть отрицательным или большим  $X_{1л}$ ), либо лежать в пределах линии. Если второй корень лежит за пределами линии, его легко выявить и отбросить. Он не имеет физического смысла, поскольку уравнения (37) и (39) верны лишь при КЗ в пределах линии.

Гораздо сложнее обстоит дело, если второй корень тоже лежит в пределах линии. Оба корня полностью удовлетворяют двум исходным уравнениям. Графическая интерпретация двух правильных решений дана на рис. 43. Рассмотрен случай, когда сопротивлению на зажимах устройства  $Z$  и углу  $\alpha$  соответствуют два сопротивления

линии до места КЗ:  $Z'_{1к}$  и  $Z''_{1к}$ . Это возможно, если угол между векторами  $\Delta Z''$  и  $\Delta Z'$  равен  $\beta'' - \beta'$ , где  $\beta'$  и  $\beta''$  — углы  $\beta$ , соответствующие двум расстояниям до места КЗ. Подобная ситуация имеет место для всех  $Z$ , расположенных на окружности, опирающейся на концы векторов  $Z'_{1к}$  и  $Z''_{1к}$  и являющейся геометрическим местом вершин равных вписанных углов  $\beta'' - \beta'$ . Каждая точка окружности соответствует определенному значению угла  $\alpha$ , а вся окружность соответствует изменению  $\alpha$  от 0 до  $360^\circ$ .

Таким образом, при КЗ в двух разных точках ( $\beta' \neq \beta''$ ) могут получаться одинаковые значения  $Z$  и  $\alpha$ . Конечно, при этом другие электрические величины будут различать-

ся. В частности, диаграмма рис. 43 имеет место в случае КЗ в точке  $Z'_{1к}$  при много больших значениях  $R_{\Sigma}$  и  $\delta$ , чем в случае КЗ в точке  $Z''_{1к}$ , т. е. используя дополнительную информацию об электрических величинах, принципиально можно выбрать из двух корней правильный. Однако подробнее вопрос использования дополнительной информации в данной работе не рассматривается.

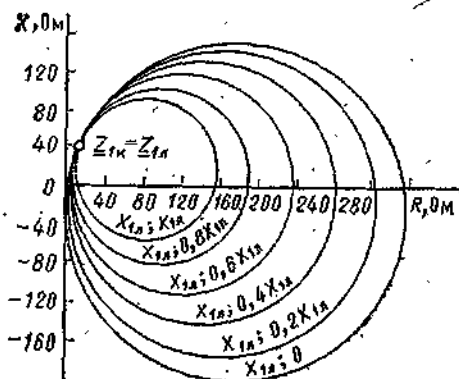


Рис. 44

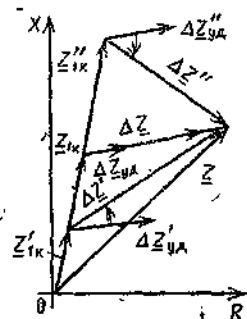


Рис. 45

Рис. 44. Определение области плоскости сопротивлений, соответствующей наличию двух корней уравнения (42) в пределах линии

Рис. 45. Взаимное расположение векторов  $\Delta Z$  и  $\Delta Z_{уд}$  при различном предполагаемом расстоянии до места КЗ

Представляет интерес оценка вероятности получения двух корней, соответствующих КЗ в пределах линии. Представление о поставленном вопросе дает рис. 44, на котором для рассматриваемой передачи (см. рис. 6) построены окружности типа приведенных на рис. 43. Рассмотрены однофазные КЗ в конце линии. Около каждой окружности обозначены значения соответствующих ей корней. Вся часть плоскости, заключенная между окружностями  $(X_{1л}; X_{1к})$  и  $(X_{1л}; 0)$ , соответствует наличию у уравнения (42) двух корней, соответствующих КЗ в пределах линии. Однако при расположении конца вектора  $Z$  внутри окружности  $(X_{1л}; X_{1л})$  или вне окружности  $(X_{1л}; 0)$  уравнение (42) будет иметь однозначное решение. Как следует из рис. 44, можно считать, что наличие двух корней, соответствующих КЗ в пределах линии, возможно лишь при наличии довольно больших переходных сопротивлений.



Не углубляясь в подробный анализ, отметим, что взаимное расположение окружностей на рис. 44 определяется характером зависимости  $\beta = f(X_{1к})$ . Если бы указанная зависимость была прямолинейной, все окружности имели бы почти одинаковые размеры и вероятность наличия двух корней в пределах линии была бы незначительна. Диаметр окружностей уменьшается с увеличением степени выпуклости вниз зависимости  $\beta = f(X_{1к})$ . Как следует из рис. 40, все зависимости  $\beta = f(X_{1к})$  выпуклы вниз, причем степень кривизны возрастает с приближением точки КЗ к концу линии и с уменьшением сопротивления системы противоположной стороны линии. Соответственно возрастает вероятность получения двух корней в пределах линии.

Для получения количественных результатов были произведены статистические расчеты вероятности нахождения двух корней в пределах линии. Рассматривались КЗ на линиях 220 кВ с параметрами, равномерно распределенными в диапазонах табл. 4. Углы между ЭДС равномерно распределялись в диапазоне от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ . Получившиеся значения вероятности появления корней различных видов сведены в табл. 11.

Таблица 11

Диапазон распределения $R_n$ , Ом	Вероятность, % получения		
	одного корня отрицательного, другого в пределах линии	одного корня больше $X_{1л}$ , другого в пределах линии	двух корней в пределах линии
0÷10	0,1	98,3	1,6
10÷20	0,6	93,4	6
20÷30	1,1	89,4	9,5

Согласно данным табл. 11, при переходном сопротивлении до 10 Ом случаи затруднений с выбором правильного корня весьма редки, но с ростом  $R_n$  процент таких случаев становится значительным.

Для количественной оценки возможных погрешностей метода ООМП путем решения уравнения (42) произведены расчеты методом статистических испытаний с заданием параметров передач 220 кВ по табл. 4 и с дополнительным учетом возможности ошибок в замере значений величин  $R$ ,  $X$ ,  $A$  и  $B$  на  $\pm 3\%$ , а также в задании величин  $X_{0с1}$  и  $X_{0с2}$  на  $\pm 30\%$ . Значение ошибки для каждого указанного параметра получалось от генератора случайных независимых чисел, равномерно распределенных в указанных пределах. Затем полученные неточные значения параметров подстав-

Таблица 12

Диапазон изменения $\delta$ , град	$\sigma_{\text{ск}}$ (%) при изменении $R_{\text{н}}$ в диапазоне		
	0÷10 Ом	10÷20 Ом	20÷30 Ом
0÷30	1,29	1,65	2,12
30÷60	1,77	3,2	4,57
60÷90	2,82	5,3	6,7
0÷-30	1,0	1,2	1,5
-30÷-60	0,9	1,1	1,3
-60÷-90	0,86	1,1	1,2

лялись в формулы (42) — (46) и решалось уравнение (42). Определялась среднеквадратическая приведенная погрешность из 1000 расчетов. Полученные результаты сведены в табл. 12.

К приведенным данным следует подходить осторожно, поскольку принятый равномерный закон распределения погрешностей измерения параметров далек от действительности, а истинные законы распределения на данном этапе неизвестны. Однако и из данных табл. 12 можно сделать определенные выводы: в частности, о малой критичности способа расчета к точности задания исходных данных, об относительно невысоких погрешностях ООМП на передающих концах линий и о возможности редких, но значительных погрешностей на приемных концах линий.

Кроме решения уравнения (42) возможен и другой путь совместного решения уравнений (37) и (39) — итерационный расчет на ЭВМ. Сущность его заключается в постепенном приближении к искомой точке КЗ от некоторой начальной точки, взятой произвольно. Для выбора критерия, определяющего направление передвижения от начальной точки, рассмотрим рис. 45.

На рис. 45 рассмотрено КЗ в точке, сопротивление до которой равно  $Z_{\text{ик}}$ . Сопротивление на зажимах устройства ООМП равно  $Z$ , разность между  $Z$  и  $Z_{\text{ик}}$  равна  $\Delta Z$ . На основании выражения (16) вектор  $\Delta Z$  равен

$$\Delta Z = \frac{3R_{\text{н}}I_{0\text{к}}}{I_{\text{ф}} + KI_0} = \frac{3R_{\text{н}}I_0}{C_{\text{оп}}(I_{\text{ф}} + KI_0)}.$$

Введем понятие удельного отклонения сопротивления, равного

$$\Delta Z_{\text{уд}} = \frac{3I_0}{C_{\text{оп}}(I_{\text{ф}} + KI_0)}.$$

Как следует из приведенных формул и рис. 45, направление векторов  $\Delta \underline{Z}$  и  $\Delta \underline{Z}_{уд}$  совпадают, если входящий в формулу для  $\Delta \underline{Z}_{уд}$  коэффициент токораспределения подсчитан для точки  $\bar{K}3$ .

Предположим, что во время КЗ в устройстве ООМП измерены  $\underline{Z}$  и  $I_0/(I_\Phi + KI_0)$ . Затем в ходе итерационного расчета принято слишком малое значение сопротивления до места КЗ  $\underline{Z}'_{1к}$ . Для этого места можно рассчитать по известной схеме нулевой последовательности значение  $\underline{C}_{ор}$ , найти направление вектора  $\Delta \underline{Z}'_{уд}$  и направление вектора  $\Delta \underline{Z}'$ . Как видно из рис. 45, при  $\underline{Z}'_{1к} < \underline{Z}_{1к}$  угол  $\arg(\Delta \underline{Z}'/\Delta \underline{Z}'_{уд})$  положителен.

Если же в ходе расчета принято слишком большое сопротивление  $\underline{Z}''_{1к}$ , то этот угол будет отрицательным (рис. 45). Следовательно, значение и знак угла  $\arg(\Delta \underline{Z}/\Delta \underline{Z}_{уд})$  могут служить критерием для управления ходом итерационного расчета.

Приведенное построение (рис. 45) соответствует случаю, когда вектор  $\underline{Z}$  имеет меньший угол с осью  $R$  по сравнению с вектором  $\underline{Z}_{1к}$ . В случае, когда угол вектора  $\underline{Z}$  больше угла  $\underline{Z}_{1к}$ , знак угла  $\arg(\Delta \underline{Z}/\Delta \underline{Z}_{уд})$  меняется на противоположный.

Итерационный расчет состоит из следующих этапов.

**Этап 1.** Принимается начальное расстояние до места КЗ, равное половине длины линии:  $l_k = 0,5l$ . Принимается начальный шаг итерации, равный половине длины линии:  $\Delta l_k = 0,5l$ .

**Этап 2.** Для принятого  $l_k$  рассчитываются значения  $\underline{Z}_{1к}$ ,  $\Delta \underline{Z}$ ,  $\underline{C}_{ор}$ ,  $\Delta \underline{Z}_{уд}$ . Определяются углы  $\arg(\Delta \underline{Z}/\Delta \underline{Z}_{уд})$  и  $\arg(\underline{Z}/\underline{Z}_{1к})$ .

**Этап 3.** Если  $|\arg(\Delta \underline{Z}/\Delta \underline{Z}_{уд})|$  меньше определенного значения (например  $1^\circ$ ), то расчет кончается, а искомое расстояние до места КЗ равно  $l_k$ . Если  $|\arg(\Delta \underline{Z}/\Delta \underline{Z}_{уд})| > 1^\circ$ , то определяются знаки углов  $\arg(\Delta \underline{Z}/\Delta \underline{Z}_{уд})$  и  $\arg(\underline{Z}/\underline{Z}_{1к})$ .

После сравнения знаков указанных углов можно определить, занижено или завышено значение  $l_k$  по сравнению с искомым расстоянием до места КЗ.

**Этап 4.** Определяется новый шаг итерации  $\Delta l_k = \Delta l_k/2$  и новое значение предполагаемого расстояния до места КЗ  $l_k = l_k \pm \Delta l_k$ . Знак перед вторым слагаемым выбран на

третьем этапе. Новое значение  $I_k$  циклически передается на начало второго этапа.

Рассмотренный итерационный расчет всегда дает единственное решение. Но если на линии имеются две точки, полностью удовлетворяющие исходным уравнениям (см. рис. 43), расчет может привести к любой из них. Следовательно, результаты итерационного расчета тоже должны проверяться с привлечением дополнительной информации.

Все сказанное относилось к однофазному КЗ. Остановимся на других видах КЗ.

При КЗ между двумя фазами (В и С) без земли через сопротивление  $R_n$  сопротивление на зажимах устройства ООМП равно:

$$Z = \frac{\dot{U}_{BC}}{I_B - I_C} = Z_{1K} + \frac{I_K R_n}{I_B - I_C},$$

где  $I_K$  — ток в переходном сопротивлении.

В комплексной плоскости диаграмма сопротивлений имеет вид, приведенный на рис. 39, причем  $\Delta Z$  имеет наклон к горизонтали, определяемый углом комплекса  $I_K / (I_B - I_C)$ . Весьма важно, каким образом получать информацию о фазе тока  $I_K$ . Согласно [30] ее целесообразно извлекать из фазы тока обратной последовательности. Известны соотношения для точки двухфазного КЗ:

$$I_K = I_{2KB} - I_{2KC} = \sqrt{3} I_{2KA} e^{j90^\circ}.$$

Фаза тока  $I_{2KB} - I_{2KC}$  отличается от имеющейся в месте ООМП фазы тока  $I_{2B} - I_{2C}$  на угол  $\beta$ , определяемый параметрами схемы обратной последовательности.

Для ООМП при замыкании двух фаз можно использовать все перечисленные выше способы расчета по (40), (41), (42) или итерационный расчет. Для этого при КЗ необходимо измерить активную и реактивную составляющие сопротивления  $R = \operatorname{Re} [\dot{U}_{BC} / (I_B - I_C)]$ ,  $X = \operatorname{Im} [\dot{U}_{BC} / (I_B - I_C)]$  и угол  $\alpha = \arg [(I_{2B} - I_{2C}) / (I_B - I_C)]$  или заменяющие его величины  $A = \operatorname{Im} [(I_{2B} - I_{2C}) / (I_B - I_C)]$  и  $B = \operatorname{Re} [(I_{2B} - I_{2C}) / (I_B - I_C)]$ .

Входящий в (41) угол  $\beta$  равен  $\arg (I_{2A} / I_{2KA})$  и определяется по формуле, аналогичной (39):

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{X_{2C2} + X_{2L} - X_{2K}}{R_{2C2} + R_{2L} - R_{2K}} - \operatorname{arctg} \frac{X_{22}}{R_{22}}.$$

Коэффициенты уравнения (42) также получаются из (43) ... (46) после замены параметров схемы нулевой последовательности на параметры схемы обратной последовательности:

$$a = 1 - \frac{R_{1L}^2}{X_{1L}^2} - \frac{2R_{1L}}{X_{1L}} T;$$

$$\begin{aligned}
b &= (R_{202} + R_{1n} + R) R_{1n} / X_{1n} - X - X_{202} - X_{1n} - \\
&- [(X_{202} + X_{1n} + X) R_{1n} / X_{1n} + R + R_{1n} + R_{202}] T; \\
c &= X (X_{202} + X_{1n}) - R (R_{202} + R_{1n}) + \\
&+ [R (X_{202} + X_{1n}) + X (R_{202} + R_{1n})] T; \\
T &= (BR_{22} - AX_{22}) / (AR_{22} + BX_{22}).
\end{aligned}$$

Следовательно, при КЗ двух фаз возможности исключения влияния переходного сопротивления точно те же, что и при однофазном КЗ на землю. Но сразу отметим ряд особенностей междуфазных КЗ. Сопротивления систем в схеме обратной последовательности могут быть менее стабильны, чем в схеме нулевой последовательности (в предельном случае линии с односторонним питанием  $X_{20}$  определяется сопротивлением нагрузки и подвержено резким колебаниям). Кроме того, при двухфазном КЗ переходным является сопротивление дуги, которое явно нелинейно. Однако значение переходного сопротивления при двухфазном КЗ должно быть меньше, чем при КЗ на землю. Принято считать, что оно в первый момент не превосходит 5 Ом. Расчеты показывают, что при столь малых переходных сопротивлениях вполне удовлетворительную точность дают упрощенные вычисления по выражению (40), основанные на пренебрежении углом  $\beta$ .

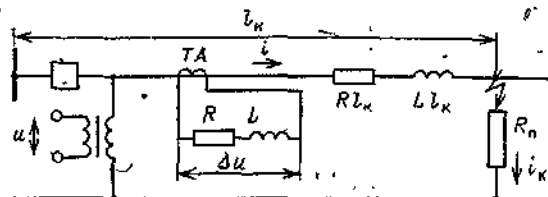
При КЗ двух фаз на землю в общем случае могут быть и фазные, и общие переходные сопротивления. Принципиально возможен расчет расстояния и по петле фаза — земля (по сопротивлению  $U_{\phi} / (I_{\phi} + KI_0)$  и схеме нулевой последовательности) и по петле фаза — фаза (по сопротивлению  $U_{\phi\phi} / (I_{\phi} - I_{\phi})$  и схеме обратной последовательности). Оба способа устраняют влияние на результат расчета общего переходного сопротивления, но не устраняют влияния фазных сопротивлений.

При симметричных трехфазных КЗ ООМП рассмотренными методами невозможно, так как они требуют наличия токов нулевой или обратной последовательности.

## 12. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ ООМП

Способы ООМП, рассмотренные в § 11, основаны на операциях с интегральными параметрами электрических величин (токов, напряжений). Термин интегральные параметры появился с внедрением ЭВМ в технику релейной защиты для того, чтобы отличить мгновенные значения синусоидальных электрических величин  $i$ ,  $u$  от характеризующих эти величины в любой момент времени параметров  $I$ ,  $\phi$ ,  $U$ ,  $\varphi$ . Употребляется термин в том смысле, что ЭВМ получает интегральные параметры путем замера и обра-

Рис. 46. К пояснению принципа ООМП путем замера мгновенных значений токов и напряжений



ботки ряда мгновенных значений, т. е. после суммирования—интегрирования информации о мгновенных значениях.

Однако известны и способы ООМП на основе операций с мгновенными значениями токов и напряжений. Рассмотрим один из них, предложенный во Франции [32] и довольно подробно освещенный в литературе (например, [12], [31]).

Для пояснения на рис. 46 представлена линия (удельные параметры  $R, L$ ), на которой имеется КЗ через  $R_n$ . К трансформатору тока подключена модель одного километра линии. Мгновенные значения напряжения на данном конце линии  $u$  и падения напряжения на одном километре  $\Delta u$  равны

$$u = i_k \left( Ri + L \frac{di}{dt} \right) + i_k R_n$$

$$\Delta u = Ri + L \frac{di}{dt}$$

Формулы предполагают абсолютно точную работу трансформатора тока  $TA$ . Тогда, они верны при любой форме тока (в том числе при наличии апериодических или высших гармонических составляющих) и при любой частоте принужденных составляющих.

Если выбрать момент, когда ток  $i_k$  равен нулю, в формуле для напряжения исчезает слагаемое, содержащее  $R_n$ . Метод ООМП и предполагает замер отношения  $u$  к  $\Delta u$  в момент перехода  $i_k$  через нулевое значение:

$$i_k = \frac{u}{\Delta u} \Big|_{i_k=0} \quad (49)$$

Возможно также измерение значений  $u$ ,  $\Delta u$ ,  $i_k$  в два момента времени:

$$u^I = i_k^I \Delta u^I + i_k^I R_n; \quad u^{II} = i_k^{II} \Delta u^{II} + i_k^{II} R_n$$

и совместное решение этих двух уравнений:

$$\frac{u^I - i_k^I \Delta u^I}{u^{II} - i_k^{II} \Delta u^{II}} = \frac{i_k^I}{i_k^{II}} \quad (50)$$

В уравнениях (49) и (50) присутствует ток  $i_k$  или ток, ему пропорциональный,  $mi_k$ . Информация об их точной фазе или значении отсутствует на данном конце линии. Поэтому в способе по [32] предложено в качестве близких к току  $i_k$  принимать при однофазных КЗ ток  $i_0$ , а при междуфазных — разность токов поврежденных фаз, т. е. при однофазном КЗ

$$I_k = \frac{u_\Phi}{\Delta u_\Phi} \Big|_{i_0=0}; \quad (51)$$

при КЗ между двумя фазами

$$I_k = \frac{u_{AB}}{\Delta u_{AB}} \Big|_{(i_A - i_B)=0}. \quad (52)$$

Такие вычисления будут иметь погрешность, поскольку разность фаз токов  $i_k$  и  $i_0$  равна углу  $\beta$ , а разность фаз токов  $i_k$  и  $(i_A - i_B)$  зависит от соотношения ЭДС систем.

Рассмотрим, каков будет результат вычислений при наличии в токах и напряжениях только принужденных составляющих. Тогда можно считать, что  $\Delta u_\Phi = (i_\Phi + Ki_0) \times (R + j\omega L)$ , где

$$R + j\omega L = Z_{yd} = R_{1\pi}/l_\pi + jX_{1\pi}/l_\pi.$$

Запишем связи между мгновенными и интегральными электрическими величинами:

$$u_A = U \sin(\varphi_U + \omega t);$$

$$i_0 = I_0 \sin(\varphi_0 + \omega t);$$

$$i = i_A + Ki_0 = I \sin(\varphi_I + \omega t);$$

$$\Delta u_A = I Z_{yd} \sin(\varphi_I + \varphi_Z + \omega t).$$

Преобразуем формулу (51) так, чтобы искомое расстояние стало функцией только от составляющих сопротивления  $Z = R + jX$ :

$$\begin{aligned} I_k &= \frac{u_A|_{i_0=0}}{\Delta u_A|_{i_0=0}} = \frac{U \sin(\varphi_U - \varphi_0)}{I Z_{yd} \sin(\varphi_Z + \varphi_I - \varphi_0)} = \\ &= \frac{Z}{Z_{yd}} \frac{\sin(\varphi_U - \varphi_I) \cos(\varphi_I - \varphi_0) + \cos(\varphi_U - \varphi_I) \sin(\varphi_I - \varphi_0)}{\sin \varphi_Z \cos(\varphi_I - \varphi_0) + \cos \varphi_Z \sin(\varphi_I - \varphi_0)} = \\ &= \frac{X \cos(\varphi_I - \varphi_0) + R \sin(\varphi_I - \varphi_0)}{\operatorname{tg} \varphi_Z \cos(\varphi_I - \varphi_0) + \sin(\varphi_I - \varphi_0)} \frac{1}{Z_{yd} \cos \varphi_Z} = \\ &= \frac{X - R \operatorname{tg}(\varphi_0 - \varphi_I) \operatorname{tg} \varphi_Z}{\operatorname{tg} \varphi_Z - \operatorname{tg}(\varphi_0 - \varphi_I) X_{yd}} \end{aligned}$$

$$I_k X_{уд} = \frac{X - R \operatorname{tg}(\varphi_0 - \varphi_I)}{\operatorname{tg} \varphi_z - \operatorname{tg}(\varphi_0 - \varphi_I)} \operatorname{tg} \varphi_z.$$

Учитывая, что согласно (35)  $\varphi_0 - \varphi_I = \alpha$ , а  $\varphi_z = \varphi_z$ , и сравнивая полученный результат с уравнениями (37) и (40), заключаем, что определение  $I_k$  путем деления мгновенных значений  $u_\phi / \Delta u$  при  $i_0 = 0$  абсолютно идентично по результатам решению уравнения (40), т. е. ООМП в предположении  $\beta = 0$ . Пренебрежение углом  $\beta$  произошло из-за того, что переход от (49) к (51) подразумевает совпадение фаз токов  $i_0$  и  $i_k$ , т. е.  $\beta = 0$ . Достоинства и недостатки ООМП по (40) уже подробно рассмотрены в § 11. В частности, рассматриваемый способ ООМП из-за неучета угла  $\beta$  должен иметь погрешности, определяемые пунктирными линиями рис. 41 и табл. 10.

Способ можно несколько изменить, чтобы результаты оказались такими же, что и при решении уравнения (41). Для этого достаточно производить замер отношения  $u_\phi / \Delta u_\phi$  в момент равенства нулю тока  $I_0 e^{-i\beta_\lambda}$ .

Аналогично можно исследовать решение уравнения (52). Если принять, что

$$u_{AB} = U \sin(\varphi_U + \omega t);$$

$$i_A - i_B = I \sin(\varphi_I + \omega t);$$

$$\Delta u_{AB} = I Z_{уд} \sin(\varphi_I + \varphi_z + \omega t)$$

и произвести преобразования, то окажется

$$I'_k = \frac{U \sin(\varphi_U - \varphi_I)}{I Z_{уд} \sin \varphi_z} = \frac{Z \sin(\varphi_U - \varphi_I)}{Z_{уд} \sin \varphi_z} = \frac{X}{X_{уд}},$$

т. е.  $I_k X_{уд} = X$ .

Следовательно, решение (52) по результатам эквивалентно замеру реактивного сопротивления до места КЗ, что на линиях с двусторонним питанием дает весьма малую точность.

Исходя из положений § 11 следует ожидать, что гораздо лучшие результаты даст при двухфазном КЗ замер отношения  $u_{AB} / \Delta u_{AB}$  в момент  $i_{2A} - i_{2B} = 0$ :

$$I_k = \frac{u_{AB}}{(i_A - i_B) Z_{уд}} \Big|_{i_{2A} - i_{2B} = 0}. \quad (53)$$

Решение (53) должно быть эквивалентно расчету по (40) при двухфазных КЗ.



Таким образом, путем фиксации мгновенных значений и решения уравнений (49), (50), (51) можно получить те же результаты, которые получаются после фиксации интегральных параметров и решения уравнения (37) при приближенном учете угла  $\beta$ . Для повышения точности ООМП выше был рассмотрен уточненный способ, предполагающий совместное решение (37) и (39). Подобные уточнения могут быть внесены и при ООМП на основе мгновенных значений.

Рассмотрим наиболее частый вид повреждения—однофазное КЗ на землю. Запишем уравнение для мгновенного значения напряжения поврежденной фазы  $u$  в точке ООМП в виде

$$u = l_k \Delta u + 3R_{\Pi} I_{0k, \max} \sin(\alpha - \beta),$$

где

$$\Delta u = (i_{\Phi} + k' i_0) R_1 + L_1 \frac{d(i_{\Phi} + k'' i_0)}{dt};$$

$$k' = \frac{R_0 - R_1}{R_1}; \quad k'' = \frac{L_0 - L_1}{L_1};$$

$R_1, R_0, L_1, L_0$ —активная и индуктивная составляющие сопротивления одного километра линии в схемах прямой и нулевой последовательностей;  $\alpha$ —фаза тока нулевой последовательности в месте замера;  $3I_{0k, \max}$ ,  $(\alpha - \beta)$ —максимальное значение и фаза тока в переходном сопротивлении.

Величины  $\alpha$  и  $\Delta u$  могут быть измерены на данном конце линии. В уравнении остаются три неизвестных.

Если производить измерение в два момента времени (I и II), то можно составить два независимых уравнения. Поделив первое на второе получаем аналог уравнения (50):

$$\frac{u^I - l_k \Delta u^I}{u^{II} - l_k \Delta u^{II}} = \frac{\sin(\alpha^I - \beta)}{\sin(\alpha^{II} - \beta)} \quad (54)$$

В уравнении два неизвестных— $l_k$  и  $\beta$ . Добавочного независимого уравнения путем одностороннего замера получить нельзя. Но при известных параметрах схемы нулевой последовательности можно использовать однозначность зависимости угла  $\beta$  от  $l_k$ , т. е. воспользоваться уравнением (39).

Совместное решение уравнений (54) и (39) относительно  $l_k$  приводит к квадратному уравнению

$$a l_k^2 + b l_k + c = 0, \quad (55)$$

где  $a = q \Delta u' - n \Delta u''$ ;  $b = n u'' - m \Delta u'' - q u' - p \Delta u'$ ;

$$c = mu'' + pu';$$

$$m = (X_{0c2} + X_{0л}) R_{00} - (R_{0c2} + R_{0л}) X_{00};$$

$$p = (R_{0c2} + R_{0л}) R_{00} + (X_{0c2} + X_{0л}) X_{00};$$

$$n = R_0 X_{00} - \omega L_0 R_{00}; \quad q = \omega L_0 X_{00} + R_0 R_{00};$$

$u'$ ,  $u''$ ,  $\Delta u'$ ,  $\Delta u''$  — значения напряжения  $u$  и удельного падения напряжения  $\Delta u$  в моменты, когда  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$  соответственно. Они могут быть найдены по известным значениям  $u^I$ ,  $u^{II}$ ,  $\Delta u^I$ ,  $\Delta u^{II}$ :

$$u' = u^I (\cos \alpha^I - t \sin \alpha^I); \quad \Delta u' = \Delta u^I (\cos \alpha^I - f \sin \alpha^I);$$

$$u'' = u^I (\sin \alpha^I + t \cos \alpha^I); \quad \Delta u'' = \Delta u^I (\sin \alpha^I + f \cos \alpha^I);$$

$$t = \frac{u^{II}}{u^I \sin (\alpha^{II} - \alpha^I)} - \operatorname{ctg} (\alpha^{II} - \alpha^I);$$

$$f = \frac{\Delta u^I}{\Delta u^I \sin (\alpha^{II} - \alpha^I)} - \operatorname{ctg} (\alpha^{II} - \alpha^I).$$

После подсчета всех коэффициентов квадратное уравнение (55) решается обычным образом и имеет два корня, один из которых — искомое расстояние  $l_k$ . Результаты расчетов по (55) совершенно идентичны результатам расчетов по уравнению (42). Свойства корней уравнения и достижимая точность метода ООМП подробно рассмотрены в § 11.

Из сказанного следует, что рассмотренные способы ООМП на основе замера мгновенных значений токов и напряжений в сущности повторяют соответствующие способы ООМП на основе замера интегральных значений величин и являются частной реализацией дистанционного принципа.

### 13. ВОЗМОЖНОСТИ ООМП НА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ, ЛИНИЯХ С ОБХОДНЫМИ СВЯЗЯМИ И ЛИНИЯХ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

**Параллельные линии с взаимной индукцией в схеме нулевой последовательности** (см. рис. 10). Как уже указано в гл. 1, точный замер сопротивления на линии с взаимной индукцией возможен при включении устройства ООМП по токовым цепям на ток фазы, ток нулевой последовательности своей линии  $I_{01}$  и ток той же последовательности параллельной линии  $I_{0II}$ . На основании выражения (12) можно записать для сопротивления в месте установки

устройства при однофазном КЗ:

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_\phi}{I_\phi + \underline{K}I_{01} + \frac{\underline{Z}_M}{\underline{Z}_{1\lambda 1}} I_{011}} = \underline{Z}_{1\kappa} + \frac{3R_{\pi} I_{0\kappa}}{I_\phi + \underline{K}I_{01} + \frac{\underline{Z}_M}{\underline{Z}_{1\lambda 1}} I_{011}}. \quad (56)$$

В гл. 1 приведен ряд соображений, которые делают нежелательным применение в схеме компенсации тока параллельной линии в устройствах релейной защиты. Однако все эти соображения относятся к взаимному согласованию защит. Устройства ООМП между собой не согласуются и должны работать еще до начала отключения КЗ. Поэтому в них несомненно целесообразно использовать ток нулевой последовательности параллельной линии для компенсации влияния взаимной индукции.

Более того, информацию о токе  $I_{011}$  целесообразно использовать и для определения положения вектора  $\Delta \underline{Z}$ , т. е. считать, что  $\arg \Delta \underline{Z} = \alpha - \beta$ , где

$$\alpha = \arg \left[ (I_{01} + I_{011}) / \left( I_\phi + \underline{K}I_{01} + \frac{\underline{Z}_M}{\underline{Z}_{1\lambda 1}} I_{011} \right) \right]. \quad (57)$$

$$\beta = \arg [(I_{01} + I_{011}) / I_{0\kappa}]. \quad (58)$$

Угол  $\alpha$  может быть измерен во время КЗ. Угол  $\beta$  зависит от расстояния до места КЗ, причем эта зависимость имеет такой же характер, что и у одиночных линий.

Используя обозначения, введенные в приложении П1, можно считать, что  $\beta = \arg C_{ор,с}$ , т. е.  $\beta$  численно равен углу коэффициента токораспределения для тока в сопротивлении системы.

При принятом включении устройства ООМП по токовым цепям остаются полностью справедливы диаграммы сопротивлений (см. рис. 39) и формула для реактивной составляющей сопротивления до места КЗ (37). Следовательно, возможен примерный расчет реактивного сопротивления по формулам (40) и (41) и уточненный расчет путем совместного решения (37) и зависимости  $\beta = f(X_{1\kappa})$ , которая на основании формулы приложения П1 для величины  $\underline{C}_{ор,с}$  имеет вид:

$$\beta = \arctg \frac{X_{1\lambda}(X_{0с2} + X'_{0\lambda}) - X_{1\kappa}X'_{0\lambda}}{X_{1\lambda}(R_{0с2} + R'_{0\lambda}) - X_{1\kappa}R'_{0\lambda}} - \arctg \frac{X_{00}}{R_{00}}. \quad (59)$$

Сравнивая (59) с (39), можно заключить, что структура выражения для угла  $\beta$  при появлении параллельной

цепи не меняется, только вместо  $R_{0л}$  и  $X_{0л}$  следует подставлять  $R'_{0л}$  и  $X'_{0л}$ , причем

$$R'_{0л} + jX'_{0л} = \frac{Z_{0лI} \cdot Z_{0лII} - Z_M^2}{Z_{0лI} + Z_{0лII} - 2Z_M};$$

$$R_{00} + jX_{00} = Z_{00I} + R'_{0л} + jX'_{0л} + Z_{002}.$$

Очевидно, при совместном решении (37) и (59) получится квадратное уравнение (42), коэффициенты которого определятся выражениями (43), (44), (45), только везде вместо значений  $R_{0л}$  и  $X_{0л}$  следует подставлять значения  $R'_{0л}$  и  $X'_{0л}$ . Выражения (47) и (48) в связи с изменением способа измерения угла  $\alpha$  следует записать в виде

$$A = \operatorname{Im} \frac{I_{0I} + I_{0II}}{I_\phi + K I_{0I} + \frac{Z_M}{Z_{1лI}} I_{0II}}; \quad B = \operatorname{Re} \frac{I_{0I} + I_{0II}}{I_\phi + K I_{0I} + \frac{Z_M}{Z_{1лI}} I_{0II}}.$$

Таким образом в метод и примерного, и точного ООМП наличие взаимной индукции с параллельной линией принципиальных изменений не вносит. Следует лишь при измерении  $Z$  и  $\alpha$  использовать информацию о токе нулевой последовательности параллельной линии. Все расчетные выражения остаются те же, что и на одиночной линии, трудоемкость расчетов не изменяется. Более того, после отключения параллельной линии ток  $I_{0II}$  становится равным нулю, но устройство ООМП останется работоспособным, если внести в программу изменения, обеспечивающие переход от расчетов с подстановкой значений  $R'_{0л}$  и  $X'_{0л}$  к расчетам с подстановкой значений  $R_{0л}$  и  $X_{0л}$ .

По аналогии несложно найти все изменения, которые вносит наличие параллельной цепи в ООМП на основе измерения мгновенных значений электрических величин.

**Линия с обходными связями без взаимной индукции.** В сложносамкнутой сети у линии могут быть обходные связи самой различной конфигурации. Но известными приемами эквивалентирования всегда можно свести их влияние к включению в расчетную схему трех сопротивлений, два из которых параллельно объединяются с сопротивлениями систем, а третье—назовем его  $Z_{00,с}$ —включено параллельно сопротивлению линии.

Принципиально для ООМП можно было бы воспользоваться уже рассмотренными формулами учета параллельной цепи, только в формулах принять  $Z_M = 0$ . Но тогда возникает проблема измерения угла  $\alpha$  по выражению (57),

поскольку в него входит ток нулевой последовательности, проходящий по сопротивлению обходной связи  $Z_{00,c}$ . Для получения этого тока пришлось бы суммировать токи нулевой последовательности многочисленных присоединений, что связано с усложнением устройства ООМП.

Поэтому для линии с обходной связью рассмотрим формулы ООМП, использующие те же величины, что и на одиночной линии: сопротивление  $Z = U_\Phi / (I_\Phi + KI_0)$  и угол  $\alpha = \arg [I_0 / (I_\Phi + KI_0)]$ . Наличие обходной связи не изменяет вид диаграммы рис. 39 и формулы (37), т. е. не изменяет примерных расчетов по (40) и (41). Но при уточненном расчете следует учесть, что зависимость  $\beta = f(X_{1к})$  при появлении обходной связи изменяет свой вид. Эта зависимость может быть найдена на основании формул приложения III и имеет вид

$$\beta = \arg C_{op} = \operatorname{arctg} \frac{(X_{oc2} + X_{ol})'' - \frac{X_{1к}}{X_{1п}} X_{ol}''}{(R_{oc2} + R_{ol})'' - \frac{X_{1к}}{X_{1п}} R_{ol}''} - \operatorname{arctg} \frac{X_{ol}}{R_{00}}, \quad (60)$$

где

$$R_{ol}'' + jX_{ol}'' = \frac{Z_{ol}}{Z_{ol} + Z_{00,c}} \left( Z_{00} + \frac{Z_{00,c}^2}{Z_{ol} + Z_{00,c}} \right);$$

$$(R_{oc2} + R_{ol})'' + j(X_{oc2} + X_{ol})'' = Z_{00} - Z_{oc1} \frac{Z_{00,c}}{Z_{ol} + Z_{00,c}};$$

$$R_{00} + jX_{00} = Z_{oc1} + \frac{Z_{ol} Z_{00,c}}{Z_{ol} + Z_{00,c}} + Z_{oc2}.$$

Сравнивая (60) с (39), приходим к выводу, что при совместном решении уравнений (37) и (60) получится квадратное уравнение (42), коэффициенты которого определяются формулами (43), (44), (45), но вместо величин  $R_{ol}$  и  $X_{ol}$  следует подставить  $R_{ol}''$  и  $X_{ol}''$ , а вместо двучленов  $(R_{oc2} + R_{ol})$  и  $(X_{oc2} + X_{ol})$  следует подставить  $(R_{oc2} + R_{ol})''$  и  $(X_{oc2} + X_{ol})''$ . Технически устройство ООМП может быть выполнено так же, как и на одиночной линии. Трудоемкость расчетов не изменяется по сравнению со случаем одиночной линии, поскольку все этапы расчета, на которых учитывается влияние обходных связей, приходится на предварительную подготовку алгоритма, проводимую при наладке устройства ООМП.

Конкретные расчеты, проведенные для схем параллельных линий и линий с обходными связями, показали, что

появление у линии обходных цепей улучшает точность всех рассмотренных выше методов ООМП. Повышается точность расчетов и по приближенным формулам (40) и (41), и по уточненной (42). Объясняется это уменьшением углов  $\beta$  по сравнению со случаем одиночной линии. Например, для линии по схеме рис. 6 максимальное значение угла  $\beta$  равно  $6,3^\circ$ . При наличии у той же линии параллельной цепи с взаимной индукцией значение  $\beta$  снижается до  $5,8^\circ$ . Если же взаимная индукция с параллельной цепью отсутствует, то максимальное значение  $\beta$  снижается до  $4,4^\circ$ . Снижение значений угла  $\beta$  при относительно небольшом изменении длины вектора  $\Delta Z$  повышает точность всех рассмотренных методов ООМП.

**Линия большой протяженности.** Влияние поперечных проводимостей существенно затрудняет ООМП на длинных линиях. Если на такой линии произошло однофазное КЗ через переходное сопротивление, то связь между электрическими величинами устанавливается выражением (24)

$$3I_{\text{ок}}R_n = \underline{D}_1 \dot{U}_\phi + (\underline{D}_0 - \underline{D}_1) \dot{U}_0 - \underline{B}_1 \dot{I}_\phi - (\underline{B}_0 - \underline{B}_1) \dot{I}_0.$$

Из данного выражения можно определить сопротивление петли КЗ при наличии в устройстве ООМП компенсации по току фазы и току нулевой последовательности:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{B}_1}{\underline{D}_1} + \frac{-3I_{\text{ок}}R_n}{\underline{D}_1(\dot{I}_\phi + K\dot{I}_0)}, \quad (61)$$

где коэффициент  $K$  определяется по выражению (30):

$$K = \frac{\underline{B}_0 - \underline{B}_1}{\underline{B}_1} - \frac{\underline{D}_1 - \underline{D}_0}{\underline{B}_1} \underline{Z}_{\text{оси}}.$$

Таким образом, на длинных линиях ООМП усложняется за счет факторов:

а) сложной зависимости сопротивления петли металлического КЗ  $\underline{B}_1/\underline{D}_1$  от расстояния. При удалении КЗ соотношение  $\underline{B}_1/\underline{D}_1$  меняется и по значению, и по углу (см. рис. 22), являясь сложной функцией расстояния. Изменение угла сопротивления приводит к отсутствию единого угла  $\phi_n$ , играющего столь большую роль в выражениях (37), (40) и (41);

б) зависимости коэффициента компенсации  $K$  от расстояния (см. рис. 23, 24), которая играет весьма важную роль. На достаточно длинной линии невозможно заранее

выбрать единственное значение коэффициента  $K$ . Любое заранее принятое значение  $K$  не обеспечивает фиксированного (независимого от режима систем) сопротивления на зажимах даже при металлических КЗ по всей длине линии (рис. 25).

Однако имеются и факторы, облегчающие ООМП на длинных линиях:

а) меньшие значения переходных сопротивлений на линиях сверхвысоких напряжений, чем на линиях 110—220 кВ. Объясняется это большими размерами опоры и заземляющего контура опоры. Для линий 500 кВ и выше обычно в теоретических разработках принимается, что значение  $R_n$  не превышает 15 Ом. Особенно важно, что уменьшение  $R_n$  происходит на фоне увеличения сопротивления самой линии, т. е. вносимая переходным сопротивлением погрешность уменьшается;

б) относительно небольшие значения углов  $\beta$ , объясняемые малыми значениями активных составляющих сопротивлений проводов линий сверхвысоких напряжений. Отметим, что принципиально углы  $\beta$  на длинных линиях могут быть и весьма значительными. Это возможно, если устройство ООМП установлено не в начале, а в промежуточной точке передачи. Из рис. 21 видно, что на относительно коротком участке вблизи точки  $F$  передачи фаза тока нулевой последовательности (т. е. и угол  $\beta$ ) изменяется на  $180^\circ$ . Если бы передача была разбита на участки и одно из устройств ООМП оказалось вблизи этой точки, большие значения угла  $\beta$  поставили бы под сомнение возможность ООМП. Однако рассмотренная ситуация маловероятна, поскольку при разбиении передачи на участки обычно появляются промежуточные подстанции с заземленными автотрансформаторами, что сразу улучшает условия функционирования устройств ООМП.

Конкретные расчеты показывают, что зависимость значений  $B_1/D_1$  и  $K$  от расстояния делает практически неприемлемыми упрощенные расчеты по формулам (40), (41), (50), (51) при длинах линий больших 400—500 км. Для более точного ООМП с учетом продольных и поперечных параметров линии можно было бы попытаться найти аналитическую формулу, подобную (42). Но если такая формула и существует, она должна быть весьма сложной, поскольку на длинной линии нельзя однозначно фиксировать даже сопротивление петли КЗ, так как заранее не известен коэффициент компенсации  $K$ . Из всех рассмотренных выше путей остается один—итерационный расчет, принцип

которого рассмотрен в § 11. При итерационном расчете последовательно задаются различные расстояния до места КЗ, а при известном расстоянии можно рассчитать и значения  $\underline{K}$  и  $\underline{B}_1/\underline{D}_1$ .

Исходными данными для расчета могут служить значения электрических величин  $\underline{I}_\Phi/\underline{U}_\Phi$ , и  $\underline{I}_0/\underline{U}_\Phi$ , измеренные во время КЗ, сопротивления эквивалентных систем в схеме нулевой последовательности  $\underline{Z}_{0c1}$  и  $\underline{Z}_{0c2}$ , параметры длинной линии  $\gamma_1$ ,  $\underline{Z}_{c1}$ ,  $\gamma_0$ ,  $\underline{Z}_{c0}$ , которые определяются по выражениям (31). На каждом шаге расчета принимается определенное расстояние до места КЗ  $\underline{l}_k$  (первоначально равное половине длины линии, затем каждый раз участок, на котором ищется точка КЗ, делится пополам). Для принятого  $\underline{l}_k$  подсчитываются параметры  $\underline{B}_1$ ,  $\underline{D}_1$ ,  $\underline{B}_0$ ,  $\underline{D}_0$ , коэффициент компенсации  $\underline{K}$ , сопротивление петли металлического КЗ  $\underline{B}_1/\underline{D}_1$ , сопротивление петли реально существующего КЗ

$$\underline{Z} = \left( \frac{\underline{I}_\Phi}{\underline{U}_\Phi} + \underline{K} \frac{\underline{I}_0}{\underline{U}_\Phi} \right)^{-1}, \quad \text{коэффициент токораспределения}$$

в схеме нулевой последовательности  $\underline{C}_{op}$ , удельное сопротивление (соответствующее переходному сопротивлению в

$$1 \text{ Ом}) \quad \underline{\Delta Z}_{уд} = \frac{3\underline{I}_0}{\underline{U}_\Phi \underline{C}_{op} \underline{D}_1 \left( \frac{\underline{I}_\Phi}{\underline{U}_\Phi} + \underline{K} \frac{\underline{I}_0}{\underline{U}_\Phi} \right)}.$$

В качестве критерия близости между рассчитанной моделью короткозамкнутой линии и реальной линией принимается угол между векторами  $\underline{\Delta Z}_{уд}$  и  $\underline{\Delta Z} = \underline{Z} - \underline{B}_1/\underline{D}_1$  (см. рис. 45). Расчет кончается, если абсолютное значение угла меньше  $1^\circ$ . Этапы расчета уже рассмотрены в § 11 применительно к короткой линии.

На первый взгляд кажется, что итерационный расчет требует ЭВМ со сложным математическим обеспечением из-за необходимости рассчитывать входящие в выражения (31) гиперболические функции комплексных величин. Опыт расчетов показывает, что данное затруднение легко преодолевается, если заранее рассчитать и занести в массивы параметры  $\underline{B}_1$ ,  $\underline{D}_1$ ,  $\underline{B}_0$ ,  $\underline{D}_0$  для десяти точек, равномерно распределенных вдоль длины линии. Затем текущие значения параметров берутся из массивов с применением линейной интерполяции.

Для оценки погрешностей итерационного ООМП проведены статистические испытания для линий 750 кВ, пара-



метры которых равномерно распределены в следующих диапазонах:

$Z_{1c1}, Z_{1c2}, \text{ Ом}$	$j10 \div j200$
$Z_{0c1}/Z_{1c1}$	$0,7 \div 1,4$
$E_2/E_1$	$0,7 \div 1,4$
$\arg(\dot{E}_2/\dot{E}_1)$	$-90^\circ \div +90^\circ$
$R_n, \text{ Ом}$	$0 \div 15$
$l_k/l$	$0,6 \div 1$

В указанных условиях среднеквадратическая погрешность ООМП при однофазных КЗ на линиях длиной в 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000 и 1100 км оказалась равной 1,6; 1,6; 1,7; 1,1; 1,5; 1,7; 2 и 0,7% соответственно, т. е. принципиально итерационный расчет вполне пригоден для ООМП на длинных линиях.

Дополнительно отметим, что итерационный расчет позволяет весьма просто находить значение переходного сопротивления  $R_n = |\Delta Z / \Delta Z_{yx}|$ . Это может быть использовано для сбора статистических данных или для проверки полученных решений.

## Глава четвертая

### ДИСТАНЦИОННЫЙ ПРИНЦИП В ЗАЩИТАХ ОТ КЗ НА ЗЕМЛЮ

#### 14. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ ОТ КЗ НА ЗЕМЛЮ

В мировой практике используются две основные разновидности защит от КЗ на землю: токовые защиты нулевой последовательности и дистанционные защиты. В некоторых странах используются практически только токовые защиты (СССР), в других—только дистанционные (страны Западной Европы), в третьих—и те, и другие (в частности, США). Приверженность специалистов той или иной страны к определенному типу защит объясняется, вероятно, чисто историческими традициями. Несомненно, каждый тип защит имеет свои преимущества и недостатки, свою оптимальную область применения.

Сравнение между собой дистанционных и токовых защит от КЗ на землю весьма затруднено и не приводит к однозначному ответу, пригодному для сети любой конфигурации. Основным преимуществом токовой защиты явля-

ется ее простота. Однако и это преимущество не бесспорно. Дело в том, что использование токовой защиты предполагает необходимость установки и сложной панели дистанционной защиты от междофазных КЗ, и сложной основной защиты—высокочастотной. Опыт стран Западной Европы показывает, что панель дистанционной защиты от всех видов КЗ по сложности незначительно превосходит панель защиты от междофазных КЗ. В то же время использование дистанционных защит от КЗ на землю значительно сужает область применения дорогостоящих высокочастотных защит, расширяет область применения такого прогрессивного вида автоматики, как ОАПВ.

Основное преимущество дистанционных защит—стабильность длины зоны действия, особенно первых ступеней, что приводит к более быстрому отключению КЗ. Известно, насколько плохие результаты дают токовые защиты в сетях сложной конфигурации, насколько трудно согласовывать между собой токовые защиты. Большой проблемой является низкая чувствительность и малая надежность органов направления мощности нулевой последовательности.

Кроме относительной сложности дистанционные защиты имеют и некоторые другие недостатки:

меньшую, чем у токовых защит, чувствительность к КЗ через переходные сопротивления, особенно вблизи конца зоны. Влияние активного  $R_n$  на значение тока нулевой последовательности много меньше, чем на сопротивление петли КЗ. В этом причина того, что для выполнения резервных ступеней защит от КЗ на землю предпочтительнее использовать не дистанционный, а токовый принцип;

затруднения в выполнении защит линий, имеющих взаимную индукцию в схеме нулевой последовательности.

В последние годы в нашей стране все сильнее проявляется интерес к дистанционному принципу, появляются новые теоретические и аппаратные разработки. Объясняется это рядом факторов, среди которых:

переход от электромеханических устройств к полупроводниковым, приводящим к снижению разницы в сложности дистанционных и токовых защит;

отмечаемое в настоящее время стремление обеспечить полноценное ближнее резервирование; определяющее целесообразность установки на одной линии нескольких защит, работающих на разных принципах;

перспектива передачи функций защиты цифровым вычислительным машинам, полностью снимающая вопрос о сложности аппаратной реализации дистанционной защиты.

Для машины отработка дистанционного алгоритма не сложнее отработки алгоритма токовой защиты;

возможность получения на базе дистанционного принципа вполне удовлетворительных устройств ООМП (см. гл. 3).

Все отмеченное выше указывает на перспективы применения дистанционного принципа в устройствах защиты от КЗ на землю.

В результате многочисленных теоретических и экспериментальных разработок в настоящее время сформировалось мнение, что целесообразно провести промышленную разработку устройства дистанционной защиты от однофазных КЗ для применения на линиях 110—330 кВ. Такая защита должна устанавливаться совместно с дистанционной защитой от междуфазных КЗ, на которую возлагаются функции отключения всех других видов КЗ (напомним, что примерно 80% всех замыканий на линии—однофазные). Имеется несколько опытных разработок защиты от однофазных КЗ. В качестве примера можно назвать разработку института «Энергосетьпроект» [33], в которой комплект защиты от однофазных КЗ содержит: три дистанционные ступени, выполненные с помощью многофазных реле сопротивления; четвертую ступень, выполненную в виде токовой направленной защиты нулевой последовательности с реле направления мощности нулевой последовательности двустороннего действия, и токовую направленную отсечку нулевой последовательности без выдержки времени, используемую в качестве дополнительной защиты.

В мировой практике существует исключительное многообразие типов дистанционных защит от КЗ на землю. Основными из них являются:

а) защиты с переключениями в целях тока или напряжения. Один измерительный орган подключается на электрические величины разных петель КЗ. Преимуществом подобного решения является его простота, недостатком—сложность с определением вида повреждения и поврежденных фаз. В гл. 2 указано, что на сильно нагруженных линиях задача определения вида повреждения весьма сложна. Однако основная масса линий 110—220 кВ работает в сложнзамкнутых сетях, имеет относительно небольшие протяженности и нагрузки. На таких линиях надежный выбор поврежденных фаз обеспечивается простейшими устройствами. Защиты с переключениями весьма широко использовались в период применения электромеханических реле. С переходом на современную элементную базу их область применения существенно сократилась;

б) защиты от КЗ на землю с тремя однофазными измерительными органами, каждый из которых включен на величины соответствующей петли КЗ. Измерительные органы используются с самыми различными характеристиками, часто довольно сложной формы;

в) защиты с измерительными органами, выполненными на многофазных реле сопротивления. Многофазные реле используют для своей работы информацию из токов и напряжений всех фаз. Такие реле будут рассмотрены ниже.

В данной главе из всего комплекса вопросов, связанных с дистанционными защитами от КЗ на землю, основное внимание будет уделено принципам выполнения и особенностям функционирования самых важных элементов — измерительных органов.

#### 15. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНЫ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ ОТ КЗ НА ЗЕМЛЮ И ВЛИЯНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАГРУЗОЧНОГО РЕЖИМА НА ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ

При всем многообразии измерительных органов защит от КЗ на землю можно выделить несколько основных типов, рассмотрение свойств которых позволит в дальнейшем судить и об органах других исполнений. Главное внимание при анализе будет уделяться функционированию измерительных органов при наличии значительных токов нагрузочного режима.

**Однофазные измерительные органы.** Это реле, включенные на напряжение фазы  $U_\phi$  и ток  $(I_\phi + KI_0)$  и сравнивающие по какому-либо алгоритму именно эти две величины. Алгоритм сравнения определяет вид характеристики в плоскости  $U_\phi / (I_\phi + KI_0)$ . Типичными являются характеристики в виде окружности или четырехугольника (рис. 47). Размеры четырехугольника могут быть самыми различными. Общей тенденцией является сужение четырехугольника на длинных линиях и расширение его на коротких. Характеристика может образовываться и другими сочетаниями дуг и прямых, что не вносит принципиальных отличий.

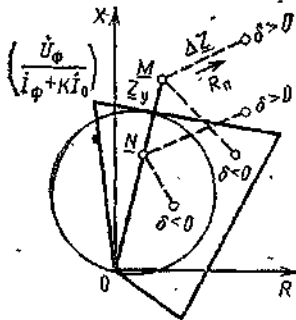


Рис. 47. Характеристики однофазных РС и влияние переходного сопротивления на функционирование РС

Однофазные измерительные органы могут применяться либо в схеме с переключениями—тогда их свойства следует рассматривать совместно со свойствами пускового органа и органа определения замкнувшейся фазы, либо в трехрелейной схеме—тогда следует рассматривать свойства всей системы из трех реле, ибо иногда именно реле неповрежденных фаз определяют свойства защиты.

Поскольку все граничные линии характеристики реле получаются сравнением между собой лишь величин  $\dot{U}_\phi$  и  $(I_\phi + KI_0)$  или их комбинаций, характеристика реле в плоскости отношения этих величин не зависит от места КЗ и режима нагрузки.

На той же диаграмме рис. 47 показаны сопротивления на зажимах реле при внешнем (в точке  $M$ ) и внутреннем (в точке  $N$ ) КЗ через активное переходное сопротивление. Под влиянием составляющих нагрузочного режима вектор  $\Delta Z$  стремится либо вверх (приемный конец линии), либо вниз (передающий конец). Следовательно, на приемном конце составляющие нагрузочного режима уменьшают чувствительность реле к переходным сопротивлениям. На передающем конце повышается чувствительность, но одновременно появляется опасность излишнего срабатывания (на рис. 47 это соответствует КЗ в точке  $M$  при угле  $\delta < 0^\circ$ ). Опасность излишнего срабатывания растет с расширением характеристики вдоль оси активных сопротивлений. Большое влияние на вероятность излишнего срабатывания имеет положение верхней граничной линии характеристики.

**Модифицированные измерительные органы.** Реле, называемые по терминологии [9] модифицированными, отличаются тем, что в качестве одной из сравниваемых величин (рабочей величины) принимается компенсированное напряжение поврежденной фазы, а в качестве второй сравниваемой величины (поляризующей) принимается сочетание напряжений неповрежденных фаз. Подобные реле широко и давно применяются зарубежными фирмами (GE, BBC), неоднократно рассматривались в литературе [7, 9].

Название величин рабочая и поляризующая связаны с выполнением реле сопротивления только на индукционной системе. В индукционном однофазном реле фазы  $A$  на рабочую обмотку подается напряжение  $\dot{U}'_A = \dot{U}_A - (I_\phi + KI_0)Z_y$ , а на поляризующую—напряжение  $\dot{U}_A$ . Переход замыкания через обе границы зоны действия реле ( $Z=0$  и  $Z=Z_y$ ) сопровождается изменением примерно на  $180^\circ$

фазы рабочего напряжения. Для четкой фиксации зоны действия к поляризующему напряжению предъявляется в сущности единственное требование—сохранение фазы, неизменной при переходе сопротивления на зажимах реле через точки 0 и  $Z_y$ . Между тем напряжение  $\dot{U}_A$  при КЗ в начале зоны обращается в нуль, что принципиально должно приводить к отказу реле. Если же взять в качестве поляризующего напряжение неповрежденных фаз, то оно при КЗ в месте установки реле почти не меняется. Следовательно, модифицированные реле гораздо более четко фиксируют точку начала зоны действия.

Простейшее модифицированное реле фазы А либо сравнивает по фазе величины  $\dot{U}'_A$  и  $\dot{U}_{BC}$ , либо сравнивает по абсолютному значению величины  $|\dot{U}'_A + \dot{U}_{BC}|$  и  $|\dot{U}'_A - \dot{U}_{BC}|$ . Но в качестве поляризующего может применяться и другое напряжение. Например, в РПИ Я. А. Шнейдером предложено для защиты линий применять реле, в котором одним из сравниваемых напряжений является  $\dot{U}'_A = \dot{U}_A - (I_A + KI_0)Z_y$ , вторым является  $\dot{U}'_{BC} = \dot{U}_{BC} - (I_{BC} - I_C)Z_y$ . Такое реле одинаково хорошо функционирует как при однофазных КЗ фазы А, так и при всех видах двухфазных КЗ. При замыканиях без земли упомянутое реле является полным аналогом реле системы А. М. Бреслера.

Известны реле, использующие в качестве поляризующего напряжение прямой последовательности одной из неповрежденных фаз. Ниже особо будет исследовано использование в качестве поляризующей величины тока нулевой последовательности или напряжения нулевой последовательности. Наконец, известны попытки использования модифицированных реле в качестве избирательных органов ОАПВ. Таким образом, число типов модифицированных реле достаточно велико.

Произведем оценку влияния составляющих нагрузочного режима на функционирование реле двух типов. Рассматриваются только однофазные КЗ на одиночных линиях с двусторонним питанием. Для оценки будут использоваться характеристики реле в плоскости  $Z^{(1)} = \dot{U}_\Phi / (I_\Phi + KI_0)$ .

Измерительный орган защиты типа  $L3\omega y a S$  фирмы ВВС включается на  $\dot{U}'_A$  и  $\dot{U}_{BC} e^{j12^\circ}$ . Реле срабатывает, если  $\dot{U}'_A$  отстает от  $\dot{U}_{BC} e^{j12^\circ}$  на угол от 0 до  $180^\circ$ . Для использования методики, описанной в приложении П2, запишем уравнение граничной линии характеристики в виде

равенства нулю скалярного произведения:

$$[\dot{U}'_A] \cdot [-j U_{BC} e^{j120^\circ}] = 0. \quad (62)$$

Приведем это уравнение к виду (78), выделив в качестве общего параметра величину  $\underline{Z}^{(1)}$ :

$$\begin{aligned} [\dot{U}'_A] \cdot [-j \dot{U}_{BC} e^{j120^\circ}] &= [\dot{U}_A - (I_A + KI_0) \underline{Z}_y] \cdot [-j (-j \sqrt{3}) \times \\ &\times (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) e^{j120^\circ}] = [\dot{U}_A - (I_A + KI_0) \underline{Z}_y] \cdot \\ &\cdot [-\sqrt{3} (\dot{U}_A - 2\dot{U}_2 - \dot{U}_0) e^{j120^\circ}] = \\ &= [\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_y] \cdot \left[ -\sqrt{3} \left( \underline{Z}^{(1)} - \frac{2\dot{U}_2 + \dot{U}_0}{I_A + KI_0} \right) e^{j120^\circ} \right] = \\ &= \left[ \frac{e^{j168^\circ}}{\sqrt{3}} (\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_y) \right] \cdot [\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}'_y], \end{aligned}$$

где

$$\underline{Z}'_y = \frac{2\dot{U}_2 + \dot{U}_0}{I_A + KI_0}.$$

Используя формулы приложения П1, можно найти параметр  $\underline{Z}'_y$ :

$$\underline{Z}'_y = - \frac{2\underline{Z}_{1c}C_{1p} + \underline{Z}_{0c}C_{0p}}{\Sigma \underline{Z}^{(1)} / (\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_{1k}) + 2C_{1p} + (K+1)C_{0p}}.$$

Согласно положениям приложения П2 характеристика реле на плоскости  $\underline{Z}^{(1)}$  представляет собой окружность, проходящую через точки  $\underline{Z}_y$  и  $\underline{Z}'_y$ , причем необходимый для нахождения центра окружности параметр  $\phi_{AB}$  равен  $168^\circ$ .

Величина  $\underline{Z}'_y$  зависит от места КЗ, сопротивления нагрузочного режима, значения переходного сопротивления, т. е. реле не имеет однозначной характеристики в плоскости  $\underline{Z}^{(1)}$ . Представление о свойствах реле можно получить лишь из рассмотрения семейства таких характеристик. В дальнейшем такое положение будет встречаться весьма часто и объясняется просто: если поведение реле определяется тремя или более слабо связанными между собой величинами, оно не может иметь единой характеристики в плоскости отношения двух из этих величин. Можно построить лишь частные характеристики, каждая из которых верна только для конкретных условий.





меры такого перемещения характеристики рассмотрены в гл. 5.

Каждая из характеристик рис. 48,а верна лишь для своего угла между ЭДС. Но характеристики не сильно отличаются одна от другой и несложно представить себе все семейство характеристик, соответствующих изменению угла  $\delta$  в пределах  $\pm 90^\circ$ , т. е. неоднозначность характеристик не мешает их наглядности.

Проведем аналогичный анализ для реле, предложенного Я. А. Шнейдером. Уравнение граничной линии такого реле имеет вид

$$[\dot{U}_A'] \cdot [-j\dot{U}'_{BC}] = 0. \quad (63)$$

Проводим для этого уравнения преобразования с целью выделения  $\underline{Z}^{(1)}$  как общего параметра

$$\begin{aligned} [\dot{U}_A - (\dot{I}_A + K\dot{I}_0)\underline{Z}_y] \cdot \{-j(-j\sqrt{3})[\dot{U}_1 - \dot{U}_2 - \underline{Z}_y(\dot{I}_1 - \dot{I}_2)]\} = \\ = [- (\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_y)] \cdot \left[ \underline{Z}^{(1)} - \frac{2\dot{U}_2 + \dot{U}_0 + \underline{Z}_y(\dot{I}_1 - \dot{I}_2)}{\dot{I}_A + K\dot{I}_0} \right] = \\ = - (\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_y) \cdot (\underline{Z}^{(1)} - \underline{P}_{BC}), \end{aligned}$$

где

$$\underline{P}_{BC} = \frac{-2\underline{Z}_{1C}\underline{C}_{1P} - \underline{Z}_{0C}\underline{C}_{0P} + \underline{Z}_y \frac{\Sigma \underline{Z}^{(1)}}{\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_{1K}}}{\frac{\Sigma \underline{Z}^{(1)}}{\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_{1K}} + 2\underline{C}_{1P} + (K+1)\underline{C}_{0P}}. \quad (64)$$

Пример характеристик рассматриваемого реле приведен на рис. 48,б. Все условия те же, что и для характеристик рис. 48,а. Характеристики рис. 48,б также «следуют» за вектором  $\Delta Z$  в еще большей мере, чем характеристики рис. 48,а.

Эффект «следования» проявляется у реле Я. А. Шнейдера и при двухфазных КЗ без земли. Покажем это, учитывая, что рассматриваемое реле в условиях КЗ без земли является полным аналогом реле системы Бреслера и его характеристика описывается уравнением

$$[\dot{U}'_1 + \dot{U}'_2] \cdot [-\dot{U}'_1 + \dot{U}'_2] = 0. \quad (65)$$

В качестве общего параметра следует принять

$$\underline{Z}^{(2)} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_C}{\dot{I}_B - \dot{I}_C} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{\dot{I}_1 - \dot{I}_2}.$$

Преобразование (65) производится в следующем порядке:

$$\begin{aligned} & [\dot{U}_1 + \dot{U}_2 - \underline{Z}_y(I_1 + I_2)] \cdot \{-[\dot{U}_1 - \dot{U}_2 - \underline{Z}_y(I_1 - I_2)]\} = \\ & = \left[ \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{I_1 - I_2} + \frac{2\dot{U}_2 - \underline{Z}_y(I_1 + I_2)}{I_1 - I_2} \right] \cdot \left\{ - \left[ \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{I_1 - I_2} - \underline{Z}_y \right] \right\} = \\ & = [-(Z^{(2)} - \underline{Z}_y')] \cdot [\underline{Z}^{(2)} - \underline{Z}_y], \end{aligned}$$

где

$$\underline{Z}_y' = \frac{-2\underline{Z}_{1c}\underline{C}_{1p} + \underline{Z}_y \frac{\Sigma Z^{(2)}}{\underline{Z}^{(2)} - \underline{Z}_{1k}}}{\frac{\Sigma Z^{(2)}}{\underline{Z}^{(2)} - \underline{Z}_{1k}} + 2\underline{C}_{1p}}$$

Характеристикой реле является окружность, диаметр которой расположен между точками  $\underline{Z}_y$  и  $\underline{Z}_y'$ .

При равенстве ЭДС эквивалентных систем  $\underline{Z}^{(2)} = \infty$  и  $\underline{Z}_y' = -\underline{Z}_{1c}$ . При неравенстве ЭДС точка  $\underline{Z}_y'$  и вся характеристика «следуют» за вектором  $\Delta Z$ . Подобное «следование» исключительно благоприятно влияет на функционирование реле системы Бреслера (и его аналогов) при КЗ вблизи концов зоны действия, придавая этому многофазному реле принципиальные преимущества перед однофазными.

Следовательно, при правильном подборе поляризующего напряжения модифицированные реле имеют преимущества перед однофазными. (Более подробный анализ указывает и на недостатки модифицированных реле, в частности на возможность срабатывания при внешнем металлическом КЗ с очень большими углами между ЭДС).

Неоднозначность характеристик модифицированных (и многофазных) реле создает известные трудности при анализе их функционирования. Частная характеристика, построенная для строго определенных условий, позволяет лишь определить, попадает или нет сопротивление на зажимах реле в данных условиях в эту характеристику, т. е. позволяет определить поведение реле только в одном режиме. Построение множества характеристик весьма трудоемко. Но в настоящее время разработаны и другие, более эффективные методы анализа функционирования реле. Построение характеристик в плоскости  $Z^{(1)}$  остается лишь наиболее наглядным методом.

**Реле с компенсацией полного падения напряжения (РКПН).** Рассмотрим отдельно, как имеющее важное

значение, модифицированное реле, у которого рабочим является компенсированное напряжение поврежденной фазы  $U'_\phi$ , а поляризующим — напряжение  $U_0$  или ток  $I_0$ . Предложенное Г. И. Атабековым реле срабатывает при отставании  $U'_\phi$  от  $I_0$ . Условие срабатывания можно записать либо в виде

$$0 < \arg(I_0/U'_\phi) < \pi,$$

либо в виде скалярного произведения

$$[-jI_0] \cdot [U'_\phi] \geq 0. \quad (66)$$

Напряжение  $U_0$  при переходе точки КЗ через место установки реле не изменяет своей фазы, а ток  $I_0$  — изменяет. Поэтому при использовании в качестве поляризующей величины напряжения  $U_0$  реле получается направленным, при использовании тока  $I_0$  — ненаправленным. Однако на практике обычно используют именно  $I_0$ , так как  $U_0$  может при удаленных КЗ иметь слишком малое значение. Рассматриваемое реле и его аналоги используются

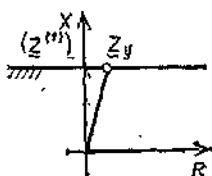


Рис. 49. Характеристика РКППН при  $Z^{(n)} = \infty$

в защитах в качестве измерительного органа (обязательно с предварительным выбором поврежденной фазы) и являются важным элементом многих многофазных реле. Характеристика РКППН при отсутствии токов нагрузочного режима имеет вид прямой, показанной на рис. 49. Поэтому РКППН иногда называют реле реактивного сопротивления, хотя при наличии токов нагрузочного режима это неверно. Для однофазного реле реактивного сопротивления нужно было бы использовать в качестве поляризующей величины ток  $I_\phi + KI_0$  и иметь условие срабатывания в виде:

$$[-j(I_\phi + KI_0)] \cdot [U'_\phi] \geq 0.$$

Характеристика такого реле имеет вид, приведенный на рис. 49, независимо от наличия составляющих нагрузочного режима. Однако такое реле из-за ряда недостатков практически не используется.

Принцип действия РКППН может быть пояснен следующим образом. При однофазном КЗ в конце зоны дей-

ствия компенсированное напряжение равно напряжению фазы в месте КЗ:  $\dot{U}'_ф = 3I_{0к}R_n$ . Если пренебречь углом  $\beta$ , то ток  $I_0$  точно совпадает по фазе с  $I_{0к}$  и с  $\dot{U}'_ф$ . Поэтому можно утверждать, что РКППН при КЗ в конце зоны действия находится на грани срабатывания независимо от значения переходного сопротивления и от наличия токов нагрузочного режима. При КЗ ближе конца зоны  $\dot{U}'_ф$  отстает от  $I_0$  и РКППН работает. При КЗ за пределами зоны  $\dot{U}'_ф$  опережает  $I_0$  и РКППН не работает. Все это пояснено векторными диаграммами на рис. 50.

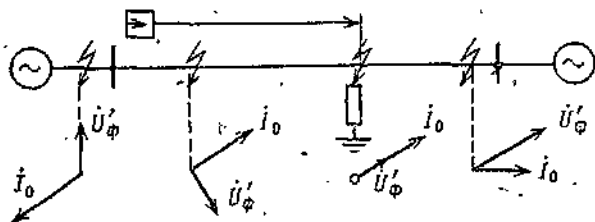


Рис. 50. Векторные диаграммы при КЗ фазы А в различных точках линии

Для нахождения параметров характеристики реле преобразуем скалярное произведение (66), выделив в качестве общего параметра  $Z^{(1)}$ :

$$\begin{aligned} [-jI_0] \cdot [\dot{U}'_A] &= [-jI_0] \cdot [(I_A + KI_0)(\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_y)] = \\ &= \left[ \frac{-jI_0}{I_A + KI_0} \right] \cdot (\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_y) = \\ &= \left[ \frac{-jC_{op}}{\frac{\Sigma \underline{Z}^{(1)}}{Z^{(H)} - Z_{1к}} + 2C_{1р} + (K+1)C_{op}} \right] \cdot (\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_y); \end{aligned}$$

Согласно приложению П2 полученное выражение соответствует характеристике в виде прямой линии, проходящей через конец  $\underline{F}_B = \underline{Z}_y$  под углом  $180^\circ + \alpha$  к горизонтали. Здесь

$$\alpha = \arg \frac{C_{op}}{\underline{C} + \Sigma \underline{Z}^{(1)} / (\underline{Z}^{(H)} - \underline{Z}_{1к})}, \quad (67)$$

а коэффициент  $\underline{C}$  определяется по (18а).

При отсутствии составляющих нагрузочного режима  $Z^{(H)} = \infty$  и  $\alpha \approx 0$ . Тогда характеристика совпадает с приве-

денной на рис. 49. При наличии токов нагрузочного режима такого совпадения нет.

При однофазном КЗ в определенной точке характеристика наклонена к горизонтали под углом  $\alpha$ . В то же время согласно (17) вектор  $\Delta Z$  наклонен к горизонтали под углом

$$\arg \Delta Z = \arg \frac{3R_{\pi}}{C + \Sigma Z^{(1)} / (Z^{(1)} - Z_{\text{КЗ}})}.$$

Сравнивая (17) и (67), с учетом (36) находим

$$\alpha = \arg \Delta Z + \arg C_{\text{оп}} = \arg \Delta Z + \beta. \quad (68)$$

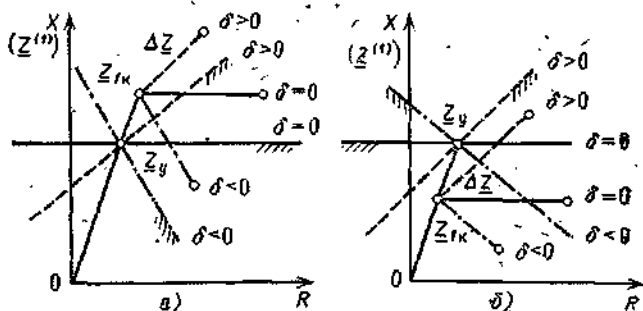


Рис. 51. Влияние токов нагрузочного режима на характеристику РКППН

Следовательно, при наличии составляющих нагрузочного режима поведение РКППН определяется семейством характеристик. Каждая характеристика проходит через точку  $Z_y$  и «следует» за вектором  $\Delta Z$ , сохраняя с указанным вектором постоянный небольшой угол, равный углу  $\beta$ . Семейства таких характеристик показаны на рис. 51,а для внешнего КЗ и на рис. 51,б для КЗ в зоне.

Как уже указывалось, точное «следование» характеристики за вектором  $\Delta Z$  придает реле существенные преимущества перед однофазными реле с точки зрения функционирования в условиях наличия в токах и напряжениях составляющих нагрузочного режима.

Однако это же «следование» характеристики за вектором  $\Delta Z$  обуславливает наличие у РКППН крупного недостатка — возможности излишнего срабатывания при внешних КЗ с качаниями и возможности отказа при внутренних КЗ с качаниями. Возможность излишнего сраба-

тивания поясняется на рис. 52,а. Если вектор  $\Delta Z$  с увеличением угла между ЭДС повернется и займет положение  $\Delta Z_2$ , то характеристика тоже повернется и совпадет с прямой 2. Конец вектора  $\Delta Z_2$  окажется в области срабатывания. Можно отметить, что возможность излишнего срабатывания появляется, когда  $\Delta Z$  пересекает ось сопротивления линии, т. е. когда приближенно (из-за неучета угла  $\beta$ ) удовлетворяется условие

$$\arg \frac{3R_{\Pi}}{\frac{\Sigma Z^{(1)}}{Z^{(H)} - Z_{1K}} + C} \approx \varphi_{\Pi}.$$

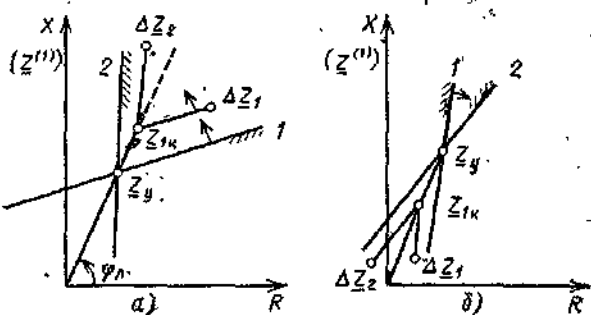


Рис. 52. Излишнее срабатывания (а) и отказы (б) РКППН при наложении качаний на однофазное КЗ

На рис. 52,б поясняется возможность отказа РКППН при КЗ в зоне. При  $\Delta Z_1$  характеристика совпадает с прямой 1 и реле работает. При  $\Delta Z_2$  реле отказывает в работе, поскольку характеристика поворачивается и совпадает с прямой 2. Во всех случаях возможность неправильного функционирования появляется при таких углах между ЭДС, при которых  $\Delta Z$  совпадает с осью сопротивления линии.

Приведенные выше характеристики РКППН позволяют получить наглядное представление о свойствах реле и объяснить особенности его функционирования при наложении качаний на КЗ. Однако в (67) входят такие величины, как  $C$  — зависящая от места КЗ,  $Z^{(H)}$  — зависящая от угла между ЭДС,  $\Sigma Z^{(1)}$  — зависящая от места КЗ и от  $R_{\Pi}$ . Поэтому функционирование реле определяется семей-

ством характеристик, каждая из которых верна лишь для одного места КЗ, одного угла между ЭДС и одного переходного сопротивления. Целесообразно попытаться уменьшить количество факторов, влияющих на вид характеристики. В частности, в работах Я. А. Шнейдера и В. А. Шабанова показано, что можно получить на плоскости  $\underline{Z}^{(1)}$  характеристику РКППН, не зависящую от значения переходного сопротивления.

Для этого перепишем уравнение характеристики

$$\left[ \frac{-j\underline{C}_{op}}{\underline{C} + \Sigma \underline{Z}^{(1)} / (\underline{Z}^{(n)} - \underline{Z}_{1K})} \right] \cdot (\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_y) \geq 0$$

в таком виде, чтобы в квадратных скобках не осталось величины  $\Sigma \underline{Z}^{(1)}$ , зависящей от  $R_{п}$ . Учтем, что на основании формул приложения П1

$$\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}^{(n)} = \frac{\frac{\underline{Z}^{(n)} \Sigma \underline{Z}^{(1)}}{\underline{Z}^{(n)} - \underline{Z}_{1K}} - \underline{C}' \underline{Z}_{1c}}{\underline{C} + \frac{\Sigma \underline{Z}^{(1)}}{\underline{Z}^{(n)} - \underline{Z}_{1K}}} - \underline{Z}^{(n)} = \frac{\underline{C} \underline{Z}^{(n)} + \underline{C}' \underline{Z}_{1c}}{\underline{C} + \frac{\Sigma \underline{Z}^{(1)}}{\underline{Z}^{(n)} - \underline{Z}_{1K}}}$$

где  $\underline{C}'$  определяется по (19).

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{-j\underline{C}_{op}}{\underline{C} + \frac{\Sigma \underline{Z}^{(1)}}{\underline{Z}^{(n)} - \underline{Z}_{1K}}} &= \frac{j\underline{C}_{op}}{\underline{C} \underline{Z}^{(n)} + \underline{C}' \underline{Z}_{1c}} \times \\ \times \frac{-(\underline{C} \underline{Z}^{(n)} + \underline{C}' \underline{Z}_{1c})}{\Sigma \underline{Z}^{(1)}} &= \frac{j\underline{C}_{op} (\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}^{(n)})}{\underline{C} \underline{Z}^{(n)} + \underline{C}' \underline{Z}_{1c}} \end{aligned}$$

С учетом сказанного уравнение граничной линии РКППН имеет вид

$$\left[ \frac{j\underline{C}_{op}}{\underline{C} \underline{Z}^{(n)} + \underline{C}' \underline{Z}_{1c}} (\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}^{(n)}) \right] \cdot (\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_y) \geq 0.$$

Согласно П2 характеристика в плоскости  $\underline{Z}^{(1)}$  представляет собой окружность, которую можно построить по параметрам

$$\underline{F}_{AB} = \frac{j\underline{C}_{op}}{\underline{C} \underline{Z}^{(n)} + \underline{C}' \underline{Z}_{1c}}; \quad \underline{F}_A = \underline{Z}^{(n)}; \quad \underline{F}_B = \underline{Z}_y.$$

Вид такой характеристики для случая внешнего однофазного КЗ показан на рис. 53 (окружность 1). Область срабатывания расположена вне окружности. Особенностью характеристики является то, что она должна пересекаться с окружностью 2 в точке  $m$ , лежащей на продолжении оси сопротивления линии. Окружность 2 является геометрическим местом концов векторов  $\underline{Z}$  при изменении  $R_n$  от 0 до  $\infty$ . Когда  $\Delta \underline{Z}$  заходит за точку  $m$ , реле начинает из-

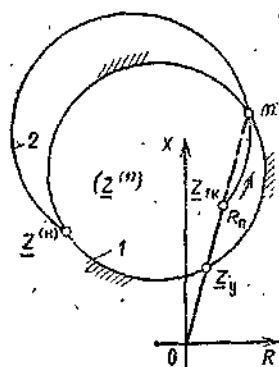
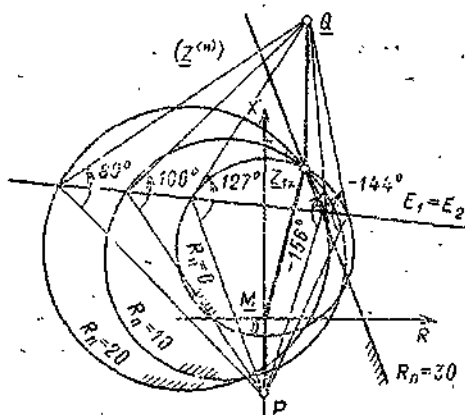


Рис. 53. Общая характеристика РКППН в плоскости  $\underline{Z}^{(n)}$





ристики в плоскости сопротивления нагрузочного режима  $Z^{(n)}$ . Для нахождения такой характеристики преобразуем (66), выделив в качестве общего параметра  $Z^{(n)}$ :

$$\dot{U}_A = I_{1к} \frac{\Sigma Z^{(1)}}{Z^{(n)} - Z_{1к}} [(1 - G) Z^{(n)} - Z_y + G Z_{1к}],$$

где

$$G = (Z_{1с} C' + C Z_y) / \Sigma Z^{(1)}; \quad (69)$$

$$[1 - j I_0] \cdot [\dot{U}_A] = \left[ \frac{-j C_{0р}}{\Sigma Z^{(1)} (1 - G)} (Z^{(n)} - Z_{1к}) \right] \cdot \left[ Z^{(n)} - \frac{Z_y - G Z_{1к}}{1 - G} \right]. \quad (70)$$

Граничная линия, описываемая выражением (70), представляет собой окружность, которую можно построить в соответствии с правилами П2 по параметрам:

$$\underline{F}_A = \underline{Z}_{1к}; \quad \underline{F}_B = \frac{Z_y - G Z_{1к}}{1 - G}; \quad \underline{F}_{AB} = \frac{-j C_{0р}}{\Sigma Z^{(1)} (1 - G)}. \quad (71)$$

Пример характеристики показан на рис. 54. Рассмотрены КЗ в конце линии (см. рис. 6) при  $Z_y = 0,85 Z_{1к}$ . Построены четыре характеристики, соответствующие однофазным КЗ через  $R_n = 0; 10; 20$  и  $30$  Ом. Все характеристики проходят через точку  $Z_{1к}$ . С ростом переходного сопротивления диаметр характеристики увеличивается.

Характеристики в плоскости  $Z^{(n)}$  позволяют определить, при каких углах между ЭДС реле подвержено излишнему срабатыванию. Как показано в гл. 1 (см. рис. 12,а); для этого достаточно любую точку граничной линии соединить с точками приложения ЭДС  $\underline{P}$  и  $\underline{Q}$  ( $\underline{PM} = -\underline{Z}_{1с}$ ,  $\underline{QM} = \underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{1с}$ ).

Длины полученных отрезков оказываются пропорциональны значениям  $E_1$  и  $E_2$ , а угол между отрезками равен углу между ЭДС. Соответственно на рис. 54 построена линия равенства ЭДС по модулю  $E_1 = E_2$  и точки пересечения этой линии с характеристиками соединены с точками  $\underline{P}$  и  $\underline{Q}$ . Замер полученных углов показывает, что на рассматриваемой линии РКППН излишне срабатывает в случае однофазного КЗ при углах между ЭДС:  $127 < \delta < 216^\circ$  при  $R_n = 0$ ;  $100 < \delta < 210^\circ$  при  $R_n = 10$  Ом;  $80 < \delta < 204^\circ$  при  $R_n = 20$  Ом;  $0 < \delta < 204^\circ$  при  $R_n = 30$  Ом.

Близкие по виду характеристики можно по тем же формулам (71) построить для КЗ в зоне. По ним можно

Рис. 55. Упрощенные характеристики РКППН в плоскости  $\underline{Z}^{(n)}$

определить предельные углы, начиная с которых реле отказывает в срабатывании.

Более подробный анализ функционирования РКППН дан в [34]. Там также отмечено неблагоприятное влияние переходных — сопротивлений,

особенно на приемном конце линии: при однофазном КЗ на землю через  $R_n$  опасность неправильного действия реле существенно увеличивается по сравнению со случаем металлического повреждения. Значения переходных сопротивлений, приводящих к неправильному действию, могут оказаться близкими к реально возможным.

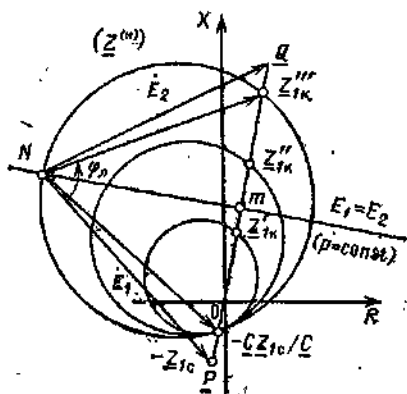
Остановимся подробнее на наиболее важном с точки зрения дальнейшего материала случае — однофазном металлическом КЗ.

Если в (71) произвести подстановку  $\underline{G}$  и  $\Sigma \underline{Z}^{(1)}$  при  $R_n = 0$ , то формулы упрощаются:

$$\underline{F}_A = \underline{Z}_{1\kappa}; \quad \underline{F}_B = -\frac{C'}{C} \underline{Z}_{1\kappa}; \quad \underline{F}_{AB} = \frac{-jC_{0p}}{C(\underline{Z}_{1\kappa} - \underline{Z}_y)}. \quad (72)$$

Отношение  $C'/C$  обычно колеблется между (0,6÷0,8), т. е. конец вектора  $\underline{F}_B$  близок к точке  $(-\underline{Z}_{1\kappa})$ . Угол  $\varphi_{AB}$  близок к  $\pm(90^\circ + \varphi_d)$ . Таким образом, семейство характеристик РКППН в плоскости  $\underline{Z}^{(n)}$  при металлических КЗ близко к показанному на рис. 55. С удалением точки КЗ характеристики становятся все шире. Если характеристика относится к внешнему КЗ, то область срабатывания находится внутри окружности. Если  $\underline{Z}_{1\kappa} < \underline{Z}_y$ , то внутри окружности находится область отказа. Все углы, вписанные в характеристику и опирающиеся на точки  $-\underline{C}'\underline{Z}_{1\kappa}/C$  и  $\underline{Z}_{1\kappa}$ , равны  $\varphi_d$  или  $(180^\circ - \varphi_d)$ .

Из рисунка видно, что не при всех КЗ возможно правильное функционирование РКППН: условием пересечения прямой  $p = \text{const}$  с характеристикой реле является



расположение точки КЗ между электрическим центром качаний и системой противоположного — конца. Из рис. 55 можно сделать целый ряд выводов относительно функционирования РКППН при внешних металлических однофазных КЗ:

а) устройство РКППН может излишне срабатывать при наложении качаний на внешнее однофазное КЗ на линии в том случае, когда точка КЗ лежит между электрическим центром качаний и системой противоположного конца линии;

б) углы между ЭДС, начиная с которых реле излишне срабатывает, уменьшаются с удалением точки КЗ. Наиболее тяжелым является случай КЗ в конце линии при весьма мощной системе противоположного конца. При этом минимальный угол излишнего срабатывания имеет величину, не меньшую угла сопротивления линии  $\varphi_L$  на приемном конце линии и не меньшую  $|180^\circ - \varphi_L|$  на передающем конце линии.

Для пояснения последнего положения достаточно рассмотреть характеристику рис. 55, соответствующую КЗ в точке  $Z_{1k}'''$ . Угол  $\angle PNQ$  при мощных системах близок к углу, вписанному в характеристику и опирающемуся на точки  $-C'Z_{1k}C$  и  $Z_{1k}''$ .

Аналогично можно сформулировать выводы о функционировании РКППН при наложении качаний на металлические КЗ в зоне:

а) устройство РКППН может отказывать при наложении качаний на металлические КЗ в зоне в том случае, если электрический центр качаний расположен между ЭДС прилегающей системы и точкой КЗ. Это эквивалентно возможности сокращения зоны, но не более чем до электрического центра качаний;

б) углы между ЭДС, начиная с которых возможен отказ, уменьшаются с удалением точки КЗ. Для реле с уставками первых ступеней угол отказа всегда больше  $\varphi_L$  на приемном конце линии и больше  $|180^\circ - \varphi_L|$  на передающем конце линии. Последнее объясняется тем, что если уставка РС меньше  $Z_{1L}$ , а рассматриваются только КЗ в зоне, то точка Q с гарантией лежит вне характеристики. Вообще же углы между ЭДС, при которых возможен отказ РКППН всегда значительно больше углов, при которых возможно излишнее срабатывание.

Современное развитие элементной базы позволяет выполнять РКППН на самых различных принципах сравне-

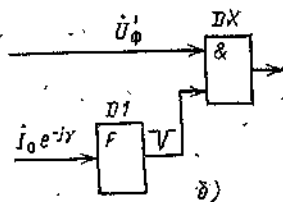
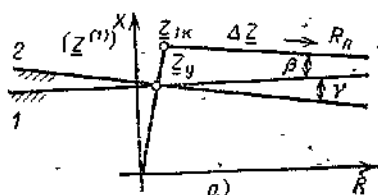


Рис. 56. Характеристика РКППН (а) и структурная схема его логической части (б)

ния двух величин по углу. Рассмотрим один из них — определение знака мгновенного значения одной из величин в момент перехода другой через нулевое значение.

Вариант структурной схемы логической части РКППН показан на рис. 56,б. Формирователь  $D1$  выдает узкие отрицательные импульсы в моменты перехода тока  $I_0 e^{-j\gamma}$  через нулевое значение в положительном направлении. Если в этот момент напряжение  $U'_{\phi}$  отрицательно, то логический элемент И ( $DX$ ) пропустит импульс на выход, т. е. условием появления импульса на выходе является отставание  $U'_{\phi}$  от  $I_0$  на угол от  $\gamma$  до  $180^\circ + \gamma$ , и характеристика реле имеет вид прямой 2 на рис. 56,а. Она наклонена на угол  $\gamma$  к прямой 1 — характеристике РКППН при  $\gamma = 0$ .

Для пояснения целесообразности поворота на том же рисунке построена ось  $\Delta Z$  для внешнего КЗ при  $Z^{(n)} = \infty$ . Согласно (68) между осью  $\Delta Z$  и характеристикой 1 имеется угол  $\beta$ . При достаточно большом переходном сопротивлении ось  $\Delta Z$  неизбежно пересечется с характеристикой 1 и реле с  $\gamma = 0$  излишне сработает. Для устранения угрозы излишнего срабатывания и следует повернуть характеристику как минимум на угол  $\gamma = \beta_n$  [8].

Для поворота характеристики достаточно, как это показано на рис. 56,б, подать на вход формирователя  $D1$  ток  $I_0 e^{-j\gamma}$ .

Выше показано, что крупным недостатком РКППН является возможность его излишнего срабатывания при наложении качаний на внешнее КЗ. В [35] предложена взаимная блокировка РКППН и однофазного РС, устраняющая этот недостаток. Принцип ее основан на том, что (см. рис. 52,а) излишние срабатывания возможны при расположении вектора  $\Delta Z$  левее оси сопротивления линии. Однофазное блокирующее РС и должно запретить работу РКППН в этих условиях. Для этого следует объеди-

нить РКППН с характеристикой 1 (рис. 57,а) и однофазное реле с характеристикой 2 через схему И.

Структурная схема логической части устройства приведена на рис. 57,б. Элементы  $D1$  и  $DX1$  повторяют схему рис. 56,б и обеспечивают получение РКППН с характеристикой 1. Элементы  $D2$  и  $DX2$  обеспечивают получение однофазной характеристики 2 сравнением по углу величин  $\dot{U}'_\phi$  и  $(\dot{I}_\phi + K\dot{I}_0)e^{j(\varphi_\Delta - \gamma'')}$ . При изменении токов нагрузочного режима характеристика 2 остается неподвижной в

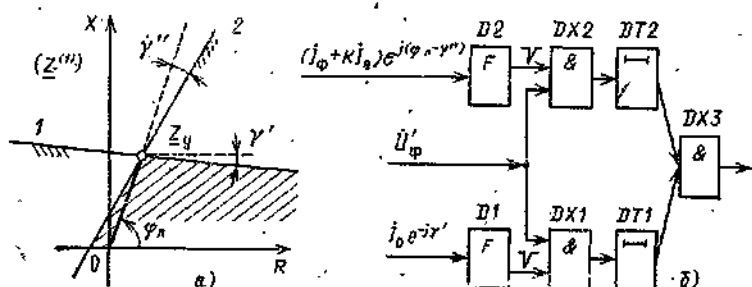


Рис. 57. Взаимная блокировка РКППН и однофазного реле

плоскости  $Z^{(1)}$ , характеристика 1 «следует» за вектором  $\Delta Z$ , как это уже показано на рис. 51. Расширители импульсов  $DT1$  и  $DT2$  и выходная ячейка И ( $DX3$ ) формируют выходной сигнал только в случае срабатывания и РКППН, и однофазного РС.

При  $Z^{(n)} = \infty$  устройство срабатывает, если конец вектора  $Z$  попадает в заштрихованную на рис. 57,а часть плоскости. Если при внешнем однофазном КЗ угол  $\delta$  растёт в положительном направлении, то вектор  $\Delta Z$  и характеристика 1 поворачиваются против часовой стрелки (см. рис. 51). Устройство РКППН в схеме рис. 57 могло бы сработать излишне при пересечении правого луча характеристики 1 с осью сопротивления линии. Однако при этом не работает однофазный блокирующий элемент. При отрицательных углах  $\delta$  характеристика 1 поворачивается по часовой стрелке и может пересечь ось сопротивления линии левым лучом. Однако если  $\gamma'' > 0$ , то и в этом случае излишнее срабатывание исключено.

Правильное функционирование при наложении качаний на внешнее КЗ в схеме рис. 57 достигнуто усложнени-

ем устройства и появлением возможности отказа его при КЗ в зоне, если сопротивление на зажимах попадает левее характеристики 2 (рис. 57,а).

**Многофазные измерительные органы.** Подробно многофазные реле сопротивления (МРС) рассматриваются в гл. 5. Здесь лишь коротко остановимся на некоторых типичных исполнениях МРС.

К настоящему времени нет общепринятого определения многофазного РС. Под *однофазным* всегда понимают РС, функционирование которого однозначно определено сопротивлением одной петли КЗ (даже если это петля междофазного КЗ). Все другие реле отнесем к многофазным.

Под *симметричным* МРС будем подразумевать реле, к которому подводятся токи и напряжения всех трех фаз, причем в алгоритме функционирования ни одной фазе не отдается предпочтения, с электрическими величинами всех трех фаз производятся одинаковые операции. В этом случае РС одинаково реагирует на КЗ на всех фазах. Классическим примером симметричного МРС является реле системы А. М. Бреслера, одинаково реагирующее на все три петли двухфазных КЗ. Правда, при исполнении на индукционной системе реле кажется несимметричным. Однако известно, что полный аналог реле Бреслера можно получить, если:

а) сравнивать модули компенсированных напряжений последовательностей с условием срабатывания  $U'_2 > U'_1$ ;

б) определять порядок чередования компенсированных междофазных напряжений  $U'_{AB}$ ,  $U'_{BC}$ ,  $U'_{CA}$ , выдавая сигнал срабатывания при смене порядка чередования на обратный;

в) определять порядок чередования компенсированных фазных напряжений.

Таким образом, в алгоритме функционирования реле Бреслера предпочтения какой-то из трех петель КЗ не отдано.

Под *несимметричным* МРС будем подразумевать реле, в алгоритме функционирования которого заранее отдано предпочтение электрическим величинам одной из фаз. В этом случае РС предназначено для реагирования на одну петлю КЗ. Чтобы обеспечить работу защиты при всех трех петлях КЗ, необходимо либо три несимметричных реле, либо устройство с органом выбора поврежденных фаз для производства переключений (в цепях тока, напряжения или в логической схеме). Примером несимметричных МРС можно считать описанные выше модифици-

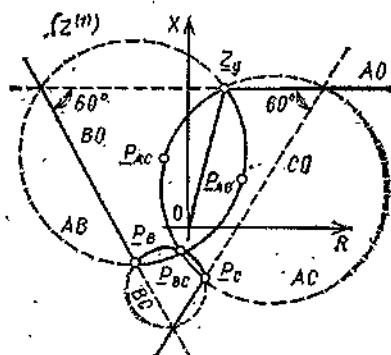


Рис. 58. Особые точки и линии плоскости  $Z^{(0)}$  при КЗ фазы А на землю в направлении срабатывания ( $Z^{(0)} = \infty$ )

рованные РС, и в частности РКППН. В гл. 5 будут рассмотрены и другие несимметричные МРС.

Ниже остановимся лишь на нескольких симметричных МРС, предназначенных для работы при однофазных КЗ

на любой из трех фаз. Все они реагируют на угловые соотношения между компенсированными напряжениями фаз и током  $I_0$ . Для всех граничные условия наступают либо при совпадении двух из подведенных величин по фазе, либо при нахождении их в противофазе, т. е. уравнения граничных линий имеют вид скалярных произведений:

$$\left. \begin{aligned} [\dot{U}'_A] \cdot [-j\dot{U}'_B] &= 0; & [\dot{U}'_B] \cdot [-j\dot{U}'_C] &= 0; & [\dot{U}'_C] \cdot [-j\dot{U}'_A] &= 0; \\ [-jI_0] \cdot [\dot{U}'_A] &= 0; & [-jI_0] \cdot [\dot{U}'_B] &= 0; & [-jI_0] \cdot [\dot{U}'_C] &= 0. \end{aligned} \right\}$$

(73)

Уравнения (73) позволяют построить на плоскости  $Z^{(0)} = \dot{U}_A / (I_A + KI_0)$  шесть граничных линий, расположение которых показано на рис. 58 для случая КЗ фазы А в направлении срабатывания при отсутствии составляющих нагрузочного режима. Построение граничных линий и нахождение особых точек, в которых они пересекаются, пояснено в приложении П4.

На рис. 58 имеются шесть особых точек:

в точках  $Z_Y$ ,  $P_B$  и  $P_C$  обращаются в нуль компенсированные фазные напряжения  $\dot{U}'_C$ ,  $\dot{U}'_A$  или  $\dot{U}'_B$  соответственно;

в точках  $P_{AB}$ ,  $P_{BC}$ ,  $P_{AC}$  обращаются в нуль компенсированные междупазные напряжения  $\dot{U}'_{AB}$ ,  $\dot{U}'_{BC}$  или  $\dot{U}'_{AC}$ .

Представляет интерес оценка физического смысла точек  $P_B$  и  $P_C$ . Поскольку рис. 58 верен лишь для КЗ в направлении срабатывания и лишь при  $Z^{(0)} = \infty$ , конец вектора  $\dot{U}_A / (I_A + KI_0)$  при активном переходном сопротивлении в эти точки попасть не может. Однако если бы осуществить эксперимент с КЗ через такое активно-емкостное сопротивление, что  $\dot{U}_A / (I_A + KI_0)$  попадает в точку

$P_c$ , то напряжение  $U'_c$  окажется равным нулю. Аналогичен и смысл других особых точек.

На том же рис. 58 нанесены прямые и окружности, служащие геометрическими местами точек, в которых две из четырех сравниваемых величин совпадают по фазе (показаны сплошными линиями) или находятся в противофазе (показаны пунктиром), т. е. являются коллинеарными.

Вдоль линии  $AO$  коллинеарны векторы  $I_0$  и  $U'_A$ . Линия проходит через точку  $Z_y$  под углом  $180^\circ + \alpha$  к горизонтالي, причем угол  $\alpha$  определяется формулой (67) или (87). Эта линия является уже рассмотренной выше характеристикой РКППН, включенного на петлю фазы  $A$ . Вдоль линии  $BO$  коллинеарны векторы  $I_0$  и  $U'_B$ , вдоль линии  $CO$  коллинеарны  $I_0$  и  $U'_C$ . Эти линии можно рассматривать как характеристики РКППН, включенных на петли фаз  $B$  и  $C$  при однофазном замыкании фазы  $A$ . Треугольник, образованный тремя рассматриваемыми линиями, равнобедренный, что непосредственно следует из данных табл. 21.

Вдоль окружности  $AC$  коллинеарны напряжения  $U'_A$  и  $U'_C$ , вдоль окружности  $AB$  —  $U'_A$  и  $U'_B$ , вдоль окружности  $BC$  —  $U'_B$  и  $U'_C$ . Все три окружности пересекаются в точке  $P_{BC}$ , причем при  $Z^{(u)} = \infty$  параметр  $P_{BC} = -Z_{1c}C'/C$ .

Отметим, что согласно формулам приложения П4 положение особых точек зависит от места КЗ, сопротивления нагрузочного режима и от значения переходного сопротивления. На рис. 58 показано только типичное расположение точек и линий при КЗ в направлении срабатывания и при  $Z^{(u)} = \infty$ . Если  $Z^{(u)} \neq \infty$ , то вся диаграмма рис. 58 будет «следовать» за вектором  $\Delta Z$ , поворачиваясь вокруг точки  $Z_y$ . При перемещении точки КЗ в направлении, противоположном срабатыванию, диаграмма совершенно меняет вид (см. гл. 5).

Рассмотрим использование диаграммы рис. 58 для оценки свойств многофазных реле. В [36] описано МРС, срабатывающее при нахождении векторов компенсированных напряжений трех фаз  $U'_A$ ,  $U'_B$ ,  $U'_C$  в одной полуплоскости векторной диаграммы, а в [6, стр. 100—117] описано МРС, срабатывающее при нахождении векторов  $U'_A$ ,  $U'_B$ ,  $U_C$  и  $(-I_0)$  в одной полуплоскости векторной диаграммы.

Принцип действия реле пояснен диаграммами рис. 59, из которых следует, что при однофазных КЗ в зоне защиты компенсированные напряжения и вектор  $(-I_0)$  расположены в одной полуплоскости. Первое из МРС сравнива-



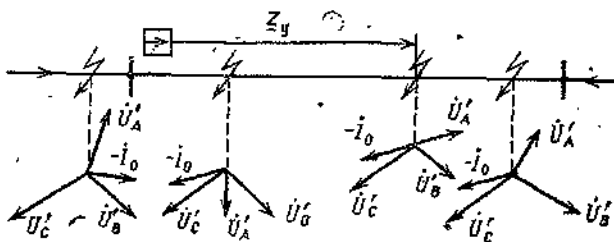


Рис. 59. Векторные диаграммы, поясняющие работу МРС при однофазном КЗ

ет лишь компенсированные напряжения, и его граничные линии соответствуют нахождению двух из компенсированных напряжений в противофазе. Такими линиями являются дуги трех окружностей, показанные на рис. 58 пунктиром. Характеристика, образованная тремя указанными дугами, изображена на рис. 60. Недостатком такого МРС является отсутствие четкой фиксации конца зоны действия при КЗ через переходное сопротивление. При таком КЗ зона немного длиннее, чем при металлическом, поскольку дуга

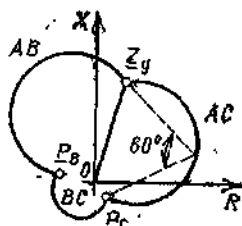


Рис. 60. Характеристика МРС, срабатывающего при нахождении компенсированных напряжений трех фаз в одной полуплоскости векторной диаграммы

окружности AC правее точки  $Z_0$  вначале идет вверх. Для ликвидации указанного недостатка во втором варианте МРС и введен вектор  $(-I_0)$ . После ввода четвертого вектора границами характеристики становятся и те лучи линий  $AO$ ,  $BO$ ,  $CO$  (см. рис. 58), которые соответствуют совпадению  $I_0$  с компенсированными напряжениями. В результате характеристика приобретает вид, показанный на рис. 61.

При КЗ фазы A определяющими линиями характеристики рис. 61 являются прямая  $AO$  — обеспечивающая четкую фиксацию конца зоны действия, и дуга  $AC$  — определяющая чувствительность реле к переходным сопротивлениям. Многофазное МРС с характеристикой по рис. 61 получило широкое распространение во Франции и послужило

основой для дальнейшего совершенствования МРС. Ниже такое МРС будем называть реле Суяра.

Поскольку одна из определяющих граничных линий реле — прямая  $A0$  — является одновременно частью характеристик РКППН, можно считать, что ввод компенсированных напряжений неповрежденных фаз является удачным примером ограничения характеристики РКППН с одновременным приданием реле свойства симметричности (характеристика РКППН не ограничена снизу и с боков, а само РКППН несимметрично).

В [23] предложен еще один принцип получения симметричного МРС-реле должно срабатывать при условии отставания векторов  $U'_A$ ,  $U'_B$  и  $U'_C$  от вектора  $I_0$  на угол от 0 до  $180^\circ$ . Границами характеристики реле могут служить линии  $A0$ ,  $B0$  и  $C0$  (см. рис. 58), поскольку каждая граничная линия соответствует коллинеарности между вектором  $I_0$  и вектором одного из компенсированных напряжений. Характеристика реле имеет вид равностороннего

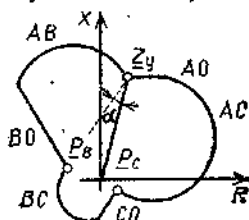


Рис. 61. Характеристика реле Суяра

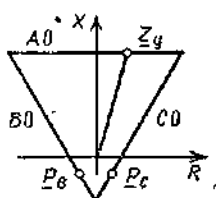


Рис. 62. Характеристика реле, срабатывающего при отставании векторов  $U'_A$ ,  $U'_B$  и  $U'_C$  от вектора  $I_0$

треугольника и приведена на рис. 62. Поскольку каждую граничную линию можно рассматривать как характеристику РКППН одной из фаз, можно сказать, что такую же характеристику имела бы защита, состоящая из РКППН трех фаз, контакты которых включены последовательно. Характеристики отдельных РКППН ограничивают одна другую и придают суммарной характеристике свойство симметричности.

Несмотря на сложность формулировки принципа действия МРС, аппаратная реализация их относительно проста. Структурные схемы логической части МРС с характеристиками по рис. 61 и 62 показаны на рис. 63,а и б. Для реализации реле Суяра в схеме рис. 63,а использован тот факт, что при расположении  $n$  векторов в одной полу-

плоскости векторной диаграммы имеются моменты времени, когда мгновенные значения всех  $n$  величин имеют один и тот же знак. Если пучок векторов занимает больше полуплоскости, таких моментов нет. Поэтому для реализации МРС с характеристикой по рис. 61 необходим один логический элемент И (ДХ).

Логическая часть реле с треугольной характеристикой показана на рис. 63,б и отличается наличием формирователя импульсов  $D$ , выдающего узкий импульс отрицатель-

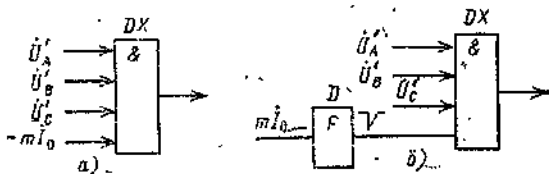


Рис. 63. Выполнение логической части МРС с характеристиками по рис. 61 и 62

ной полярности в момент перехода тока  $I_0$  через нулевое мгновенное значение в положительном направлении. Если векторы  $U'_A, U'_B$  и  $U'_C$  отстают от вектора  $I_0$ , то все величины на входе элемента И в указанный момент совпадают по знаку (отрицательны) и на выходе элемента появляется сигнал.

Сложные вопросы функционирования МРС при КЗ с качаниями между энергосистемами будут рассмотрены в гл. 5. Укажем лишь, что характеристики МРС «следуют» за вектором  $\underline{\Delta Z}$ , т. е. МРС могут срабатывать излишне при наложении качаний на внешние КЗ и могут отказывать при наложении качаний на КЗ в зоне. Характерной чертой МРС по сравнению с РКППН является то, что благодаря ограниченности размеров характеристики МРС с ростом  $R_n$  вероятность их излишнего срабатывания снижается или вовсе исчезает. Для МРС наиболее опасны металлические КЗ, в то время как РКППН ухудшает функционирование при наложении качаний на КЗ через большое  $R_n$ .

#### 16. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ОРГАН НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДО МЕСТА КЗ

В гл. 3 рассмотрены способы ООМП, позволяющие путем относительно несложных расчетов определить на основе одностороннего замера реактивную составляющую сопротивления до места КЗ. При

этом информация о токе в переходном сопротивлении  $I_{0к}$  извлекается из тока нулевой последовательности в месте замера  $I_0$ . Существующий между указанными токами угол  $\beta = \arg C_{0p}$  вызывает погрешности измерения. Возможно либо полное пренебрежение указанными погрешностями — расчет по (40) или по (51), либо приближенный учет угла  $\beta$  по его значению при КЗ в конце линии  $\beta_d$  — расчет по (41).

Достаточно простой и точный способ ООМП должен позволять выполнить на его основе дистанционную защиту. Как попытку реализовать измерительный орган такой защиты следует рассматривать предложенное в [6, стр. 100—117] реле защиты от КЗ на землю, основанное на сравнении знаков мгновенных значений компенсированного фазного напряжения  $U'_\phi$  и полного падения напряжения на защищаемом участке  $\Delta U_\phi = (I_\phi + KI_0)Z_y$  в момент перехода тока  $I_0$  через нулевое мгновенное значение.

Функция срабатывания (несрабатывания) реле  $f$  зависит от знака соотношения мгновенных значений  $\Delta U'_\phi$  и  $\Delta U_\phi$ :

$$f = \operatorname{sign} \frac{u_\phi'}{\Delta u_\phi} \Big|_{i_0=0} = \operatorname{sign} \frac{u_\phi - iZ_y}{iZ_y} \Big|_{i_0=0}, \quad (74)$$

где под  $i$  подразумевается  $(i_\phi + KI_0)$ .

Учитывая, что в гл. 3 доказана тождественность замера отношения мгновенных значений  $u_\phi$  и  $\Delta u_\phi$  с решением уравнения (40)

$$\frac{u_\phi}{iZ_{yд}} \Big|_{i_0=0} = X''_{1к},$$

произведем простейшее преобразование выражения (74):

$$f = \operatorname{sign} \left[ \frac{u_\phi}{iZ_y} \Big|_{i_0=0} - 1 \right] = \operatorname{sign} \left[ \frac{X''_{1к}}{X_y} - 1 \right] = \operatorname{sign}(X''_{1к} - X_y),$$

т. е. рассматриваемое реле можно считать основанным на сравнении реактивного сопротивления, полученного решением уравнения (40), с реактивным сопротивлением уставки и имеющим условие срабатывания  $X''_{1к} < X_y$ .

На основании материалов гл. 3 следует весьма осторожно подходить к возможности использования подобного реле в устройствах защиты. Заложенное в алгоритм функционирования пренебрежение углом  $\beta$  может приводить к существенным погрешностям в определении  $X''_{1к}$ . При этом из рис. 41 и табл. 10 следует, что погрешности растут при удалении места КЗ и почти всегда направлены в сторону уменьшения замера, т. е. реле имеет тенденцию к излишним срабатываниям, особенно на приемном конце линии.

Для устранения вероятности излишнего срабатывания при КЗ в конце линии очевидна целесообразность усовершенствования реле — переход от функционирования на основе расчета по формуле (40) к функционированию на основе расчета по формуле (41), предполага-



## 17. СТАТИСТИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ИСПОЛНЕНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

Выше рассмотрен ряд однофазных, многофазных симметричных и многофазных несимметричных измерительных органов. Для их сравнения можно было бы провести гораздо более подробный анализ функционирования каждого из реле, выявить их положительные и отрицательные свойства. Примеры такого анализа известны, однако следует признать, что чем подробнее рассмотрены свойства каждого реле, тем труднее выявить критерии, позволяющие отдать четкое предпочтение определенному реле применительно не к одной конкретной линии, а к классу линий.

Гораздо более наглядные результаты дает уже использованный в гл. 2 и 3 метод статистических испытаний. После получения от генератора случайных чисел всех параметров передачи, места КЗ и значения  $R_n$  производится расчет электрических величин и определяется, срабатывает или не срабатывает в данных условиях каждый из сравниваемых измерительных органов. После многократного повторения расчетов получают конкретные цифры. Их нельзя считать вероятностью срабатывания (несрабатывания) реле, однако соотношение их можно считать близким к соотношению вероятностей срабатывания.

Было проведено подобное исследование для одиночных линий 220 кВ с параметрами, равномерно распределенными в диапазонах табл. 4. Для каждого реле принималось, что сопротивление уставки равно  $0,85Z_{1л}$ , а коэффициент компенсации по току нулевой последовательности равен 2,5 (расчетное значение  $K_p = 2,49 - j0,27$ ). Сравнивались между собой следующие типы реле:

- однофазное реле с круговой характеристикой (окружность 1 рис. 65);
- однофазные реле с четырехугольной характеристикой (четыреугольники 2 и 3 рис. 65);
- реле фирмы ВВС с уравнением граничной линии (62);
- реле по предложению Я. А. Шнейдера с уравнением граничной линии (63);

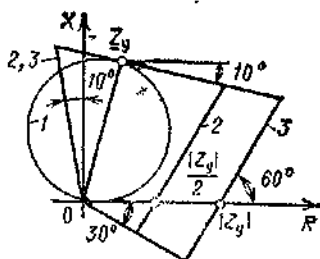


Рис. 65. Исследуемые характеристики однофазных реле

д) устройство РКППН с наклоном характеристики под углом, равным  $\beta_{\Delta}$ ;

е) реле, сравнивающее знаки  $u'_{\phi}$  и  $\Delta u_{\phi}$  в момент, когда  $I_0 e^{-\beta_{\Delta}} = 0$ ;

ж) комбинация из РКППН и однофазного реле (схема рис. 57 с  $\gamma' = \beta_{\Delta}$  и  $\phi_{\Delta} - \gamma'' = 60^\circ$ );

з) многофазное МРС с треугольной характеристикой и реле Суяра с характеристикой по рис. 61; оба имеют наклон линий  $AO$ ,  $BO$ ,  $CO$  характеристики на угол  $\beta_{\Delta}$ .

Результаты статистических испытаний функционирования РС при однофазных КЗ сведены в табл. 13, при КЗ двух фаз на землю — в табл. 14. Отдельно рассмотрены КЗ через переходные сопротивления в диапазоне 0—30 Ом и металлические КЗ. При внутренних КЗ точки замыкания равномерно распределены вдоль ближайшей половины линии, при внешних КЗ  $Z_k = Z_{\Delta}$ .

Если в какой-либо графе табл. 13 помещены две цифры, то верхняя соответствует числу срабатываний реле поврежденной фазы, а нижняя — числу срабатываний защиты, состоящей из трех реле. Из двух цифр, помещенных в графах табл. 14, верхняя соответствует отсутствию фазных переходных сопротивлений, нижняя соответствует наличию фазных переходных сопротивлений, каждое из которых равно 3 Ом.

Рассмотрение табл. 13 и 14 позволяет сделать ряд выводов о функционировании измерительных органов различных типов (выводы верны лишь для принятых условий:  $R_n$  до 30 Ом,  $\delta$  до  $\pm 90^\circ$ ).

1) Однофазные реле с круговой характеристикой имеют относительно низкую чувствительность к переходным сопротивлениям при однофазных КЗ. С переходом на четырехугольную характеристику чувствительность к  $R_n$  возрастает, однако резко возрастает и вероятность излишних срабатываний при внешних КЗ. Особенно это относится к КЗ через переходные сопротивления при отрицательных углах между ЭДС. Причина излишних срабатываний в самом характере сопротивлений на зажимах реле. Число излишних срабатываний настолько велико (12—304 из 1000 при однофазных КЗ и 330—812 из 1000 при двухфазных), что использование защит с однофазными измерительными органами в рассматриваемых условиях вообще нецелесообразно.

2) Реле фирмы ВВС имеет несколько лучшие, чем однофазные реле, показатели при однофазных КЗ. Но число излишних срабатываний при внешних двухфазных КЗ у него еще выше.

**Таблица 13**

$\frac{Z_k}{Z_n}$	Диапазон изменения $R_{\text{н. Ом}}$	Диапазон изменения $\delta$ , град	Число срабатываний (на 1000 испытаний) измерительных органов при однофазных КЗ											
			Комплект из реле трех фаз						Реле поврежденной фазы				Многофазные реле	
			Однофазные реле с характеристикой по рас. 65			Реле фирмы ВЕС	Реле Шнейдера	РКПН	Сравнение знаков $\omega, \phi$ и $\Delta \omega \phi$	Комбинация РЖПН с однофазными реле	с трехфазной характеристикой	Сузла		
			1	2	3									
			0÷0,5	0÷30	0÷+90 0÷-90	538 574	636 647	768 886	744 825	739 583 639	952 998	965 998	952 998	876 764
	0	-90÷+90	1030	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
1	0÷30	0÷+90 0÷-90	0 12	0 122	0 $\frac{302}{304}$	0 37	0 0	250 0	6 0	0 0	13 0	13 2		
	0	0÷+90 0÷-90	0 0	0 0	0 $\frac{0}{46}$	0 $\frac{0}{1}$	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 126		





3) Реле по предложению Я. А. Шнейдера имеет большую, чем однофазные реле, чувствительность к переходным сопротивлениям при внутренних однофазных КЗ и реле всех трех фаз полностью отстроены от излишних срабатываний при внешних однофазных КЗ. Однако при КЗ двух фаз на землю то же самое можно сказать лишь о реле особой фазы. Реле двух других фаз при внешних КЗ функционируют крайне неудовлетворительно, т. е. защита с реле Шнейдера должна содержать блокировки или органы выбора особой фазы, что неизбежно усложняет схему защиты.

4) Устройство РКППН и реле, сравнивающее знаки  $u_{\phi}$  и  $\Delta u_{\phi}$ , имеют весьма высокую чувствительность к переходным сопротивлениям. Однако защита с такими реле обязательно должна содержать органы выбора фазы и определения вида КЗ, так как удовлетворительно функционирует лишь одно из трех реле (поврежденной фазы при однофазных КЗ и опережающей поврежденной фазы при КЗ двух фаз на землю). Даже после выбора фазы РКППН склонно к излишним срабатываниям (при однофазных КЗ через  $R_n$  и при металлических двухфазных КЗ). Взаимная блокировка РКППН и однофазного реле по рис. 57 почти полностью снимает проблему излишних срабатываний, практически не ухудшая чувствительности.

5) Оба рассматриваемых симметричных многофазных РС не требуют органов выбора фазы и значительно превосходят однофазные реле по чувствительности к переходным сопротивлениям при однофазных КЗ. При КЗ двух фаз на землю их чувствительность к общему переходному сопротивлению невелика, но увеличивается, если имеются и фазные переходные сопротивления. Реле Суяра более чувствительно к  $R_n$ , чем реле с треугольной характеристикой. Но оно и гораздо более склонно к излишним срабатываниям, особенно при металлических КЗ и отрицательных углах между ЭДС.

Проведенный анализ подтверждает установившееся в настоящее время мнение, что дистанционную защиту от КЗ на землю целесообразно выполнять на основе симметричных МРС. Они не требуют выбора фазы, обеспечивают необходимую чувствительность к однофазным КЗ через переходное сопротивление. Относительно малая чувствительность к  $R_n$  при КЗ двух фаз на землю может быть компенсирована правильной работой при данном виде повреждений междуфазного комплекта дистанционной защиты.

Лучшие показатели, чем МРС, обеспечила бы комбинация РКППН и однофазного реле. Но она требует существенного усложнения защиты за счет органа выбора фазы и определения вида КЗ.

## Глава пятая

### МНОГОФАЗНЫЕ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЩИТ ОТ КЗ НА ЗЕМЛЮ

#### 18. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МРС

Появление многофазных реле с гораздо более сложными, чем у однофазных устройств, алгоритмами функционирования вызвало необходимость разработки специальных методов и способов анализа. Функционирование МРС определяется взаимным расположением векторов нескольких электрических величин. Большинство этих величин не принадлежит петле КЗ, т. е. граничные линии характеристик не имеют однозначного положения в какой-либо комплексной плоскости. В подобных условиях традиционный для дистанционной защиты анализ путем построения характеристик малоэффективен. Пришлось разрабатывать специальные, часто гораздо более сложные методы. Характеристика основных из них дается ниже.

**Анализ с использованием расчетных выражений.** Метод предполагает запись условий нахождения реле на границе срабатывания и приведение их к виду явных функций от одного из влияющих параметров (расчетного параметра). Затем можно задаться серией значений всех других параметров и построить серию кривых, показывающих предельные значения расчетного параметра в условиях срабатывания реле. Примеры использования данного метода для анализа МРС защит от КЗ на землю даны в [40, 34, 8]. Например, анализ функционирования РКППН в условиях наложения качаний на однофазное КЗ в направлении срабатывания через  $R_n$  ведется в [34] следующим образом.

Условие срабатывания РКППН:  $\text{Im}(\dot{U}'_A/I_0) \leq 0$ . Входящие в условие электрические величины равны:

$$\begin{aligned} \dot{U}'_A = & \frac{3[(\dot{E}_2 - \dot{E}_1)(\underline{Z}_{1c} + \underline{Z}_y) + \dot{E}_1 \underline{Z}_{11}]}{\underline{Z}_{11} \Sigma \underline{Z}^{(1)}} \times \\ & \times \left[ \dot{R}_n + \frac{2\underline{Z}_{13K} + \underline{Z}_{03K}}{3} - \underline{L}(2\underline{M} + \underline{N}) \right]; \end{aligned}$$

$$j_0 = \frac{(\dot{E}_2 - \dot{E}_1)(Z_{1c} + Z_{1k}) + \dot{E}_1 Z_{11}}{Z_{11} \Sigma Z^{(1)}} \cdot \frac{Z_{03k}}{Z_{0c} + Z_{0k}};$$

$$\underline{L} = \frac{1}{3} \frac{(1 - \underline{P})(Z_{1c} + Z_{1k}) - Z_{11}}{(1 - \underline{P})(Z_{1c} + Z_y) - Z_{11}};$$

$$\underline{M} = Z_{13k} \frac{Z_{1c} + Z_y}{Z_{1c} + Z_{1k}}; \quad \underline{N} = Z_{03k} \frac{Z_{0c} + (K + 1)Z_y}{Z_{0c} + Z_{0k}}.$$

Остальные обозначения ясны из приложения П1.

Преобразование всех приведенных формул в предположении, что  $\arg \frac{Z_{03k}}{Z_{0c} + Z_{0k}} \approx 0$  приводит к следующему выражению для  $R_n$ , при котором реле находится на грани срабатывания:

$$R_n = \left[ \frac{|2Z_{13k} + Z_{03k}|}{3} \sin(\varphi_c - \varphi'_L) - \right. \\ \left. - L \cdot |2\underline{M} + \underline{N}| \sin \varphi'_c \right] \frac{1}{\sin \varphi_L},$$

где  $\varphi_L = \arg \underline{L}$ ;  $\varphi_c = \arg (2Z_{13k} + Z_{03k})$ ;  $\varphi'_c = \arg (2\underline{M} + \underline{N})$ .

Получилось достаточно сложное выражение, по которому можно определить предельное значение  $R_n$ , если задаться значениями всех других величин. Поскольку эти значения лежат в определенных диапазонах, целесообразно многократно повторить расчеты и получить графические результаты в виде семейств кривых. Однако следует признать, что расчетные выражения даже при ряде упрощающих допущений получаются достаточно сложными. Сам анализ результатов, полученных в виде семейств кривых, тоже сложен и не обладает наглядностью.

Рассмотренный пример связан с относительно простым реле РКПН. Попытки анализа методом расчетных выражений более сложных реле встречают практически непреодолимые трудности. Поэтому широкого распространения метод расчетных выражений не получил.

**Анализ путем построения семейств характеристик.** Основы анализа МРС путем построения семейств характеристик заложены в [22]. Построение и исследование характеристик в плоскости сопротивления петли КЗ наиболее привычно для специалистов в области релейной защиты. Не явилось новинкой и использование плоскостей других параметров.

В гл. 4 при рассмотрении всех МРС строились их характеристики в плоскости  $Z^{(1)} = U_{\phi} / (I_{\phi} + K I_0)$ . Для построения достаточно формул табл. 20 и 21 приложения П4. Каждой точке КЗ соответствует своя характеристика, но они лишь незначительно отличаются друг от друга. Гораздо хуже то, что при наличии токов нагрузочного режима своя характеристика соответствует и каждому значению переходного сопротивления. Такая характеристика способна дать ответ лишь на один вопрос: срабатывает или не срабатывает МРС в рассматриваемых конкретных условиях. Поэтому традиционно принято вести анализ в два этапа. Вначале по характеристикам в плоскости  $Z^{(1)}$ , построенным для случая  $Z^{(n)} = \infty$ , оценивается чувствительность МРС к переходным сопротивлениям. Затем по характеристикам в других плоскостях оценивается влияние токов нагрузочного режима (качаний) на функционирование МРС при КЗ. На втором этапе чаще всего используется плоскость сопротивления нагрузочного режима  $Z^{(n)} = U^{(n)} / I^{(n)}$  (см. рис. 54), плоскость отношения ЭДС  $K_e = E_2 / E_1$ , плоскость отношения тока нагрузочного режима к аварийному току прямой последовательности  $K_i = I^{(n)} / I_1^{(ав)}$ . Каждая из перечисленных плоскостей позволяет достаточно полно оценить функционирование МРС при любом соотношении ЭДС концов передачи.

Важным усовершенствованием в анализе функционирования МРС является разработанный В. А. Шабановым способ переноса на плоскость  $Z^{(1)}$  осей и особых точек плоскости  $K_i$ . Способ позволяет выявить четкую связь между положением отдельных точек и линий характеристики в плоскости  $Z^{(1)}$  и функционированием МРС при наложении качаний на КЗ.

Основные свойства плоскости  $K_i$  и обоснование возможности переноса особых точек даны в приложении П5. Здесь остановимся лишь на практическом применении способа.

Для анализа функционирования МРС следует построить его характеристику в плоскости  $Z^{(1)}$  при условии  $Z^{(n)} = \infty$ . Такая характеристика верна для одной точки КЗ, но для любого переходного сопротивления. Затем для заданного значения  $R_n$  находят на плоскости три точки:  $Z_{K_{э}}$ ,  $n^{(1)}$  и  $q^{(1)}$ . Формулы для определения положения этих точек даны в приложении П5. Первая из точек равна сопротивлению на зажимах реле при принятом значении  $R_n$ , две другие точки необходимы для дальнейшего определения со-

Рис. 66. Расположение особых точек плоскости  $\underline{K}_i$  на плоскости  $\underline{Z}^{(1)}$

отношения ЭДС эквивалентных систем. Пример расположения точек относительно характеристики реле Суяра для случая внешнего однофазного КЗ приведен на рис. 66.

Теперь несложно определить соотношение ЭДС эквивалентных систем, соответствующее любой текущей точке плоскости. Для этого следует выбранную точку (например, точку  $\underline{m}$  на рис. 66) соединить с точками  $\underline{n}^{(1)}$  и  $\underline{q}^{(1)}$ , в результате чего получаются два вектора:  $(\underline{q}^{(1)} - \underline{m})$  и  $(\underline{m} - \underline{n}^{(1)})$ . Соотношение ЭДС равно

$$\frac{\underline{E}_2}{\underline{E}_1} = \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_1} \frac{\underline{q}^{(1)} - \underline{m}}{\underline{m} - \underline{n}^{(1)}},$$

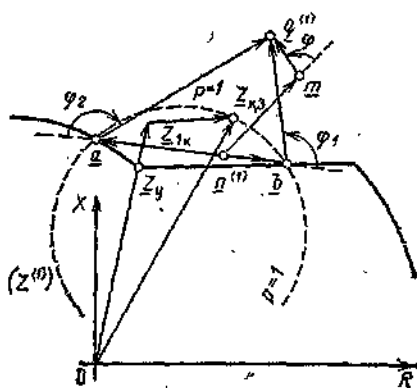
где  $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{10} + \underline{Z}_{1\kappa}$ ;  $\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{11} - \underline{Z}_1$ .

Таким образом, соотношение абсолютных значений ЭДС отличается от соотношения длин векторов на постоянный коэффициент  $\frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_1}$ , а угол между ЭДС связан с углом между векторами (углом  $\varphi$  на рис. 66):

$$\delta = \arg(\underline{Z}_{11}/\underline{Z}_1) + \varphi.$$

Подобным образом можно определить соотношение между ЭДС, соответствующее любой точке плоскости  $\underline{Z}^{(1)}$  при рассматриваемом КЗ. Если точка лежит вне характеристики МРС, то при найденном соотношении ЭДС реле не работает. Если точка лежит внутри характеристики, реле работает. Точки на граничных линиях соответствуют предельным соотношениям ЭДС эквивалентных систем.

Для определения предельных углов срабатывания МРС при заданном отношении модулей ЭДС  $p$  следует на плоскости построить окружность  $p = \text{const}$  (проходит через точку  $\underline{Z}_{\kappa,3}$ , положение центра и радиус определяются по формулам приложения П5). Для примера на рис. 66 показана окружность  $p=1$ . Она пересекается с характери-



стикой МРС в точках  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$ . Соединив точки  $\underline{a}$  и  $\underline{b}$  с точками  $\underline{n}^{(1)}$  и  $\underline{q}^{(1)}$ , находим соответствующие углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Теперь можно утверждать, что МРС не подвержено излишним срабатываниям при КЗ с углами между ЭДС систем в пределах

$$\arg(\underline{Z}_{II}/\underline{Z}_I) + \varphi_2 < \delta < \arg(\underline{Z}_{II}/\underline{Z}_I) + \varphi_1.$$

Для примера на рис. 67 изображена характеристика реле Суяра (сплошные линии) и часть треугольной характеристики (пунктирные линии) для КЗ в конце передачи

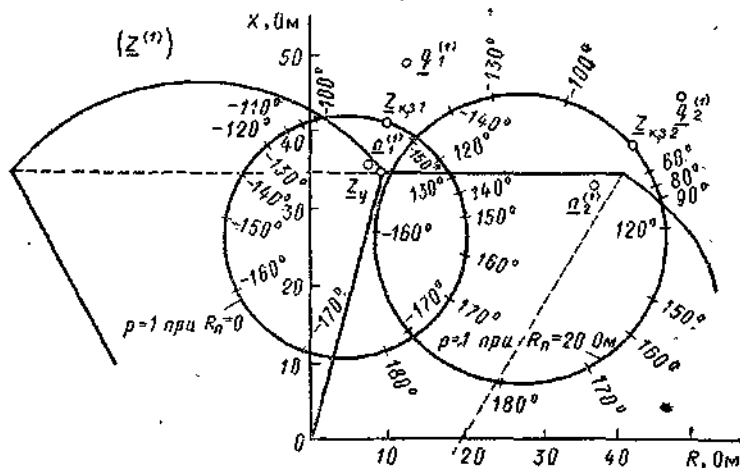


Рис. 67. Анализ функционирования МРС при наложении качаний на КЗ на передаче рис. 6

рис. 6. Коэффициент компенсации по току нулевой последовательности равен 2,21, уставка реле равна 0,85 сопротивления линии. Найдены точки  $\underline{Z}_{k31}$ ,  $\underline{n}_1^{(1)}$  и  $\underline{q}_1^{(1)}$  для металлического КЗ и точки  $\underline{Z}_{k32}$ ,  $\underline{n}_2^{(1)}$  и  $\underline{q}_2^{(1)}$  для КЗ через  $R_n=20$  Ом. Построены окружности  $r=1$  и на них нанесены точки, соответствующие определенным значениям углов между ЭДС систем. Рассматривая точки пересечения характеристик реле с окружностями  $r=1$ , заключаем, что реле Суяра правильно функционирует при углах между ЭДС  $-94^\circ < \delta < 129^\circ$  при металлических КЗ и при углах  $-154^\circ < \delta < 95^\circ$  при КЗ через  $R_n=20$  Ом. Предельные углы для реле с треугольной характеристикой равны  $-140^\circ < \delta < 129^\circ$  при металлическом КЗ и  $-154^\circ < \delta < 182^\circ$  при КЗ через  $R_n=20$  Ом.

Подобный анализ позволяет весьма наглядно связать чувствительность МРС к переходным сопротивлениям с функционированием его при наложении качаний на КЗ, определить влияние формы характеристики МРС на его свойства.

Представляет интерес анализ предельного, самого неблагоприятного расположения точек  $\underline{n}^{(1)}$  и  $\underline{q}^{(1)}$  для оценки минимального диапазона углов между ЭДС, в котором гарантируется правильное функционирование МРС. Для этого рассмотрим формулы (97) и (98) приложения П5. При металлическом КЗ и расчетном коэффициенте компенсации по току нулевой последовательности ( $\underline{Z}_{0к}/\underline{Z}_{1к} = = K + 1$ ) они приобретают вид

$$\underline{n}^{(1)} = \underline{Z}_y; \quad \underline{q}^{(1)} = \frac{\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{1к} - \underline{Z}_f\underline{Z}_y}{\underline{Z}_{11}}.$$

Следовательно, точка  $\underline{n}^{(1)}$  совпадает с точкой  $\underline{Z}_y$ , а точка  $\underline{q}^{(1)}$  с удалением места КЗ удаляется от точки  $\underline{Z}_y$  вдоль оси сопротивления линии. С удалением точки  $\underline{q}^{(1)}$  ухудшается функционирование МРС. Предельным будет случай КЗ в конце линии при весьма мощной системе противоположного конца. Тогда  $\underline{Z}_{11}$  стремится к нулю, точка  $\underline{q}^{(1)}$  уходит в бесконечность вдоль оси сопротивления линии. Радиус окружности  $\rho=1$  для этого случая равен  $R = = |\underline{Z}_y - \underline{Z}_{1к}|$ . Положение окружности  $\rho=1$  и особых точек нанесено на рис. 68. Там же показаны углы между векторами  $\underline{q}^{(1)} - \underline{m}$  и  $\underline{m} - \underline{n}^{(1)}$  для точек пересечения окружности  $\rho=1$  с характеристикой реле.

На основании подобного рассмотрения В. А. Шабановым и сделан вывод, что предельные углы правильного функционирования МРС при внешнем металлическом однофазном КЗ не меньше углов, образуемых граничными линиями характеристики, сходящимися в точке  $\underline{Z}_y$ , с осью сопротивления линии. Это правило просто и нагляд-

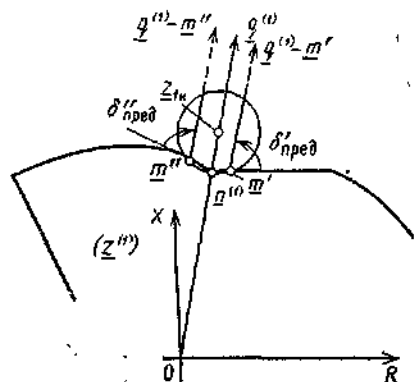


Рис. 68. Предельное расположение точек  $\underline{n}^{(1)}$  и  $\underline{q}^{(1)}$  на плоскости  $\underline{Z}^{(0)}$



но, но оно дает весьма грубую оценку наихудшего случая (КЗ на шинах системы бесконечной мощности). Реально углы правильного функционирования МРС всегда больше, чем полученные по сформулированному правилу.

Применяя данное правило к МРС, рассмотренным в гл. 4, можно сказать, что углы между ЭДС, при которых гарантирована правильная работа МРС, равны:

$(180^\circ - \varphi_L - \gamma) < \delta < \varphi_L + \gamma$  — для реле с треугольной характеристикой или для РКППН, если верхняя граничная линия у них наклонена под углом  $\gamma$ ;

$(60^\circ - \alpha) < \delta < \varphi_L + \gamma$  — для реле Суяра. Здесь  $\alpha$  — угол, показанный на рис. 61, зависит от параметров передачи:

$$\alpha = \arctg \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{C_{0p} |Z_{0c} + (K+1)Z_y| - C_{1p}(Z_{1c} + Z_y)}{C_{0p} |Z_{0c} + (K+1)Z_y| + C_{1p}(Z_{1c} + Z_y)}.$$

Теоретически угол может лежать в пределах от  $-30^\circ$  до  $+30^\circ$ , но практически всегда положителен. Из приведенных выражений виден крупный недостаток реле Суяра — возможность излишних срабатываний при внешних КЗ и относительно небольших углах между ЭДС на передающем конце линии.

**Использование ЭВМ для анализа функционирования МРС.** Обилие факторов, влияющих на функционирование МРС, сложность расчетов с учетом комплексности всех входящих в формулы величин привели к широкому использованию ЭВМ при специальных исследованиях. При этом можно отметить два основных направления:

а) анализ влияния отдельных параметров линии и систем ( $Z_{1c}$ ,  $Z_{0c}$ ,  $Z_{1c2}$ ,  $Z_{0c2}$ ,  $Z_{1k}$ ,  $\varphi_L$  и т. д.) на чувствительность реле к переходным сопротивлениям и на предельные углы правильного функционирования при наложении качаний на КЗ, проводимый путем многочисленных расчетов с широким пределом изменения исследуемого параметра с целью определения его экстремальных значений;

б) расчеты методом статистических испытаний, основанные на определении состояния МРС при большом количестве расчетов со случайным выбором параметров защищаемой сети, места КЗ и значения переходного сопротивления. Статистические расчеты, впервые примененные для анализа МРС в [11], широко использовались и при подготовке данной книги. Несмотря на отсутствие достоверных данных о законах распределения отдельных влияющих параметров, получаемые результаты позволяют составить достаточно четкие представления о свойствах отдель-

ных реле и позволяют достаточно обоснованно сравнивать различные исполнения реле между собой.

Остановимся на важнейшем вопросе — принципе выявления факта срабатывания (несрабатывания) МРС. Имеются достаточно глубокие разработки [9, 41], позволяющие найти логические формулы, соответствующие срабатыванию МРС. К тому же четко сформулированный алгоритм функционирования сам подсказывает, какие математические действия следует произвести с электрическими величинами, чтобы определить, срабатывает ли реле. Например, реле с треугольной характеристикой и наклоном верхней и граничной линии на угол  $-\beta_n$  к горизонтали срабатывает при опережении тремя векторами  $\dot{U}'_A$ ,  $\dot{U}'_B$  и  $\dot{U}'_C$  вектора  $-I_0 e^{-j\beta_n}$ , т. е. при одновременном выполнении трех условий:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Im} \frac{-I_0 e^{-j\beta_n}}{\dot{U}'_A} &\leq 0; \\ \operatorname{Im} \frac{-I_0 e^{-j\beta_n}}{\dot{U}'_B} &\leq 0; \\ \operatorname{Im} \frac{-I_0 e^{-j\beta_n}}{\dot{U}'_C} &\leq 0. \end{aligned} \right\} \quad (75)$$

Подпрограмма проверки указанных условий на языке ФОРТРАН-IV может выглядеть следующим образом:

NT=0

H1=AIMAG(T/UA1)

H2=AIMAG(T/UB1)

H3=AIMAG(T/UC1)

IF (H1.LE.0..AND.H2.LE.0..AND.H3.LE.0.) NT=1.

Перед работой подпрограммы в памяти машины должны уже иметься комплексные величины  $T=-I_0 e^{-j\beta_n}$ ,  $UA1=\dot{U}'_A$ ,  $UB1=\dot{U}'_B$ ,  $UC1=\dot{U}'_C$ . Срабатывание реле фиксируется тем, что параметр NT становится равным 1 (вначале NT приравнивается к нулю, что соответствует несрабатыванию реле). Используется математическая функция языка ФОРТРАН — AIMAG — выделение мнимой части комплексного числа. Например, команда  $H1=AIMAG \times (T/UA1)$  предполагает, что параметр H1 станет равным

мнимой части числа  $T/UA_1$ , что в обычной записи имеет вид:  $H1 = \text{Im}(-I_0 e^{-j\theta_A} / U'_A)$ . Последняя строка подпрограммы содержит операторы: IF — «если», LE. — «меньше или равно», AND. — «и», т. е. эту строку можно прочитать как: «если» ( $H1 \leq 0$ , «и»  $H2 \leq 0$ , «и»  $H3 \leq 0$ ), «то»  $NT = 1$ . Так проверяется выполнение всех условий (75).

Сложнее фиксировать срабатывание реле Суяра, т. е. нахождение четырех векторов  $U'_A$ ,  $U'_B$ ,  $U'_C$  и  $(-I_0 e^{-j\theta_A})$  в одной полуплоскости. Если один из векторов является крайним, то три остальных либо опережают его, либо отстают. Проверить это несложно. Например, если крайним является вектор  $(-I_0 e^{-j\theta_A})$ , то реле срабатывает, если все три условия (75) выполняются или все они не выполняются.

В алгоритме реле Суяра крайний вектор заранее не фиксирован — любые два из четырех векторов могут быть крайними. Поэтому принципиально возможны два пути:

а) поочередно проверить все четыре вектора; не опережает ли проверяемый вектор три остальных;

б) поочередно проверить три вектора; не является ли проверяемый вектор крайним (опережающим или отступающим). Проверять четвертый вектор нет необходимости, так как из четырех векторов, расположенных в одной полуплоскости, крайними являются два.

Подпрограмма, реализующая второй путь, может иметь вид (работает сразу после приведенной выше):

NC = 0

IF (H1.LE.0..AND.H2.LE.0..AND.H3.LE.0.)GOTO1

IF (H1.GE.0..AND.H2.GE.0..AND.H3.GE.0.)GOTO1

H4=AIMAG(UB1/IUA1)

H5=AIMAG(UB1/UC1)

IF (H2.LE.0..AND.H4.GE.0..AND.H5.GE.0.)GOTO1

IF (H2.GE.0..AND.H4.LE.0..AND.H5.LE.0.)GOTO1

H6=AIMAG(UA1/UC1)

IF (H4.LE.0..AND.H6.GE.0..AND.H1.LE.0.)GOTO1

IF (H4.GE.0..AND.H6.LE.0..AND.H1.GE.0.)GOTO1

GOTO2

1 NC=1

2 — продолжение программы.

Кроме уже поясненных в подпрограмме участвуют операторы GE. — «больше или равно» и GOTOM — «идти на метку M».

В начале подпрограммы параметр  $NC$  равен нулю (несрабатывание реле). Если управление попадает на метку 1, то  $NC$  окажется равен 1 (срабатывание реле).

По ходу программы:

проверяется, не является ли вектор  $(-I_0 e^{-j\beta_L})$  крайним в полуплоскости (опережающим всех или отстающим от всех);

подсчитываются величины  $\text{Im}(U'_B/U'_A)$  и  $\text{Im}(U'_B/U'_C)$ ;

проверяется, не является ли вектор  $U'_B$  крайним;

подсчитывается величина  $\text{Im}(U'_A/U'_C)$ ;

проверяется, не является ли вектор  $U'_A$  крайним.

Если проверяемый вектор оказался крайним в полуплоскости, то управление переходит на метку 1, где фиксируется срабатывание реле. Если ни один из векторов не оказался крайним, управление будет передано на метку 2 — продолжение программы.

#### 19. СИММЕТРИЧНЫЕ МРС С РЕГУЛИРУЕМОЙ ФОРМОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В гл. 4 рассмотрено несколько основных типов симметричных МРС. Они реагируют на угловые соотношения между четырьмя величинами  $U'_A$ ,  $U'_B$ ,  $U'_C$ ,  $I_0$  и имеют довольно сложные формы характеристик. Отличительной особенностью характеристик является то, что они получаются как бы «сами собой», определяются не настройкой отдельных параметров устройства, а соотношением параметров линии и систем. Между тем желательно иметь возможность влиять на форму характеристики, увеличивать или уменьшать ее размеры, изменяя при этом и чувствительность к переходным сопротивлениям, и функционирование в условиях наложения качаний на КЗ. Это позволит для конкретных линий подбирать оптимальные характеристики реле.

Основная тенденция изменения формы характеристики определяется тем, что функционирование МРС при наложении качаний на металлическое КЗ определяется в основном положением двух граничных линий характеристики, проходящих через точку  $Z_y$  (см. § 18). А чувствительность к переходным сопротивлениям определяется совсем другой линией — той, которая ограничивает распространение области срабатывания вдоль оси  $R$ .

Рассмотрим выполнение МРС с регулируемой характеристикой.

**Выполнение МРС с трехлучевой характеристикой.** Реле с треугольной характеристикой срабатывает, если векторы  $\dot{U}'_A$ ,  $\dot{U}'_B$  и  $\dot{U}'_C$  отстают от вектора  $\dot{I}_0$  на угол от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . В [38] предложено расширить алгоритм функционирования реле и выполнить его срабатывающим, если векторы компенсированных напряжений всех трех фаз отстают от вектора тока нулевой последовательности на угол от  $0^\circ$  до  $(180^\circ + \varphi)$ . Характеристика становится состоящей из трех лучей, как это показано на рис. 69,а. Граничные линии удовлетворяют одному из двух уравнений

$$[-jI_0] \cdot [\dot{U}'_\phi] = 0 \text{ или } [-jI_0 e^{-j\varphi}] \cdot [\dot{U}'_\phi] = 0$$

и строятся по формулам табл. 21.

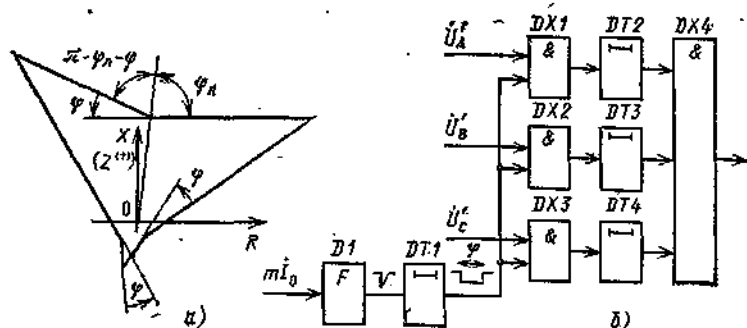


Рис. 69. Многофазное МРС с трехлучевой характеристикой

Реализация логической части реле возможна по схеме рис. 69,б. Формирователь  $D1$  выдает узкий отрицательный импульс в момент перехода  $\dot{I}_0$  через нулевое мгновенное значение в положительном направлении. В расширителе  $DT1$  этот импульс приобретает длительность, равную  $\varphi$ . На входы логических элементов И  $DX1$ ,  $DX2$ ,  $DX3$  поступают по одному компенсированному напряжению и импульс от тока  $\dot{I}_0$ . Если во время существования этого импульса соответствующее компенсированное напряжение отрицательно, на выходе элемента появляется сигнал. Это произойдет, если компенсированное напряжение отстает от тока  $\dot{I}_0$  на угол от  $0^\circ$  до  $180^\circ + \varphi$ . Импульсы, появляющиеся на выходах  $DX1$ ,  $DX2$  и  $DX3$  расширяются элементами  $DT2$ ,  $DT3$  и  $DT4$  до ширины, большей  $\varphi$ , и поступают на выходную ячейку  $DX4$ . Она даст сигнал срабатывания, если за время существования импульса на выходе  $DT1$  появлялись сигналы на выходах всех трех элементов  $DX1$ ,  $DX2$  и  $DX3$ .

Изменяя угол  $\varphi$ , можно регулировать характеристику срабатывания. При  $\varphi=0$  трехлучевая характеристика превращается в уже известную треугольную. При  $\varphi=180^\circ$  областью срабатывания является вся плоскость сопротивления. Вообще же имеет смысл изменение угла  $\varphi$  только в пределах от  $0$  до  $60^\circ$ , так как уже при  $\varphi=60^\circ$  характеристика уходит в бесконечность вдоль оси  $R$ .

Верхние граничные линии характеристики образуют с осью сопротивления линии углы  $\varphi_L$  и  $(\pi - \varphi_L - \varphi)$ . Следовательно, правильное функционирование при наложении качаний на металлическое КЗ гарантируется при углах между ЭДС

$$-(\pi - \varphi_L - \varphi) < \delta < \varphi_L. \quad (76)$$

**Выполнение МРС с комбинированной характеристикой.** В [38] предложен и другой принцип выполнения МРС: реле должно срабатывать, если на векторной диаграмме в секторе, соответствующем отставанию от тока нулевой последовательности на угол от  $0^\circ$  до  $(180^\circ + \varphi)$ , существует полуплоскость, в которой расположены векторы компенсированных напряжений всех трех фаз.

Для определения формы характеристики такого реле при однофазных КЗ в направлении срабатывания учтем, что в сформулированный алгоритм входит требование расположения векторов компенсированных напряжений трех фаз в одной полуплоскости векторной диаграммы. Указанному требованию соответствует характеристика рис. 60, образованная тремя дугами. Второму требованию — отставанию компенсированных напряжений от тока  $I_0$  на определенный угол — соответствует трехлучевая характеристика рис. 69. Полный алгоритм предполагает одновременное выполнение обоих требований. Поэтому результирующая характеристика имеет вид, показанный на рис. 70,а. Структурная схема логической части приведена на рис. 70,б. Она отличается от схемы реле с треугольной характеристикой (рис. 63,б) лишь наличием расширителя импульсов  $DT$ , обеспечивающего расширение узких импульсов до длительности, соответствующей  $\varphi$ .

Характеристика изменяется с ростом угла  $\varphi$ . При  $\varphi=0$  реле имеет треугольную характеристику, при  $\varphi=60+70^\circ$  характеристика совпадает по внешнему виду с приведенной на рис. 61. При дальнейшем росте угла  $\varphi$  до  $180^\circ$  вид характеристики при однофазном КЗ в направлении срабатывания не изменяется. Наконец, при  $\varphi=180^\circ$  реле с комбинированной характеристикой становится полным аналогом реле Суяра.

Следует отметить, что при  $\varphi=60+70^\circ$  реле с комбинированной характеристикой не является аналогом реле Суяра, несмотря на идентичность характеристик при однофазных КЗ в направлении срабатывания. Реле с комбинированной характеристикой работает только тогда, когда ток  $I_0$  опережает все компенсированные напряжения. В алгоритме функционирования реле Суяра такого требования нет — вектор  $I_0$  может и отставать от векторов компенсированных напряжений. При однофазных КЗ в на-

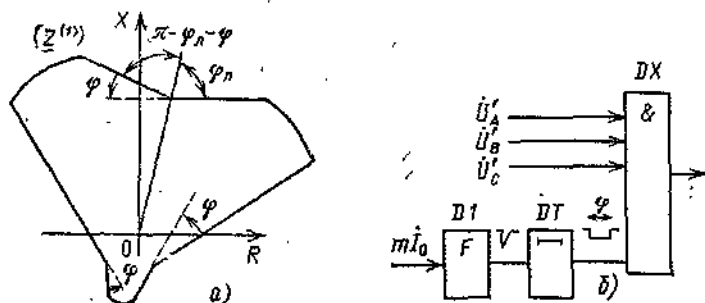


Рис. 70. Многофазное РС с комбинированной характеристикой

правлении срабатывания отставание напряжений от  $I_0$  обеспечивается всегда и реле имеют идентичные характеристики. Но в других режимах (в частности, при КЗ в направлении, противоположном срабатыванию) вектор  $I_0$  может оказаться отстающим. Тогда реле с комбинированной характеристикой и реле Суяра будут вести себя по-разному.

Поскольку граничные линии характеристики, сходящиеся к точке  $\underline{Z}_y$ , у реле по рис. 69 и 70 совпадают, правильное функционирование при наложении качаний на металлическое КЗ у МРС с комбинированной характеристикой обеспечивается при тех же углах, что и у реле с треугольной характеристикой в соответствии с выражением (76).

Изменение чувствительности к переходным сопротивлениям шириной импульсов в цепях компенсированных напряжений. В рассмотренной выше схеме по рис. 70,б на вход элемента И подаются компенсированные напряжения трех фаз и импульс, момент возникновения которого определяется фазой тока нулевой последовательности. Но можно и на три первых входа подать импульсы, определенным образом сформированные из компенсированных фазных напряжений. Для этого следует ввести формирователи им-

пульсов в цепи всех четырех входов элемента И [11]. Имеются шесть вариантов получения таким образом симметричных МРС. Все они сведены в табл. 15. Первые три варианта уже рассмотрены—реле Суяра, реле с треугольной характеристикой и реле с комбинированной характеристикой. Они различаются лишь шириной импульса в цепи тока нулевой последовательности.

Следующие три реле имеют регулирование ширины всех четырех импульсов. В частности, получение реле со сжатой характеристикой связано с сужением сзади всех четырех импульсов на одну и ту же величину, соответствующую углу  $\beta$ . Для построения характеристики такого реле можно сформулировать его условие срабатывания следующим образом: реле срабатывает, если все четыре входные величины занимают на векторной диаграмме сектор с углом, меньшим  $(180^\circ - \beta)$ .

Если из четырех входных векторов вектор  $\underline{A}$  опережающий, а вектор  $\underline{B}$  отстающий, то граничная линия характеристики, определяющая условия выхода вектора  $\underline{B}$  из сектора, описывается уравнением в виде скалярного произведения:  $[\underline{A} \cdot e^{-j\beta}] \cdot [-j\underline{B}] = 0$ . Вся характеристика реле ограничена шестью линиями, уравнения которых имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} [\dot{U}'_A e^{-j\beta}] \cdot [-j\dot{U}'_B] &= 0; & [-jI_0 e^{-j\beta}] \cdot [\dot{U}'_A] &= 0; \\ [\dot{U}'_B e^{-j\beta}] \cdot [-j\dot{U}'_C] &= 0; & [-jI_0 e^{-j\beta}] \cdot [\dot{U}'_B] &= 0; \\ [\dot{U}'_C e^{-j\beta}] \cdot [-j\dot{U}'_A] &= 0; & [-jI_0 e^{-j\beta}] \cdot [\dot{U}'_C] &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (77)$$

Построение граничных линий по формулам П4 дает характеристику, приведенную на рис. 71. Область срабатывания сжата по сравнению с характеристикой реле Суяра. Это уменьшает чувствительность к  $R_n$ , но повышает селективность при наложении качаний на внешнее КЗ. Отсутствие излишних срабатываний гарантируется при углах между ЭДС в пределах  $-(60^\circ - \alpha + \beta) < \delta < \varphi_n + \beta$ .

Реле по [42] имеет расширенные импульсы в цепях компенсированных напряжений и суженный импульс в цепи тока  $I_0$ . Характеристика его приведена на рис. 72. Расширение импульсов в цепях компенсированных напряжений увеличило область, занимаемую характеристикой. Сужение импульса в цепи тока  $I_0$  необходимо для того, чтобы оставить граничные линии  $A0$ ,  $B0$ ,  $C0$  в том же положении, какое они занимают у нерегулируемых симметричных МРС. У характеристики явно неудовлетворительно распо-



Электрические величины и соответствующие им формы импульсов

Тип реле	$\dot{U}_A^p$	$\dot{U}_B^p$	$\dot{U}_C^p$	$-\dot{I}_a$
Реле Суэра				
Реле с треугольной характеристикой				
Реле с комбинированной характеристикой				
Реле со сжатой характеристикой				
Реле по [42]				
Реле по [20]				

ложена линия  $AB$ , что должно привести к большой вероятности излишних срабатываний на передающем конце линии.

Указанного недостатка лишено реле по [20]. Характеристика его показана на рис. 73. Реле имеет возможность раздельного изменения чувствительности к переходным сопротивлениям (изменением угла  $\beta$ ) и селективности при наложении качаний на КЗ (изменением угла  $\varphi$ ).

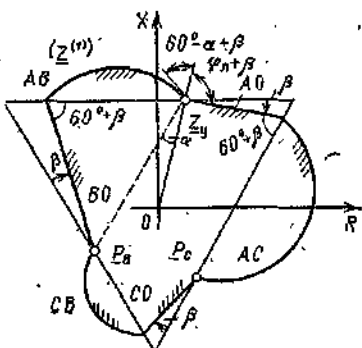


Рис. 71. Сжатая характеристика МРС

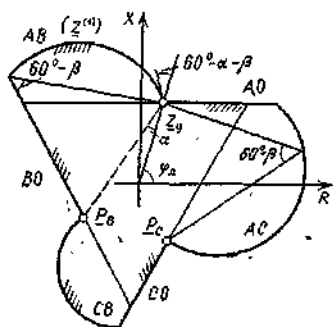


Рис. 72. Характеристика МРС по [42]

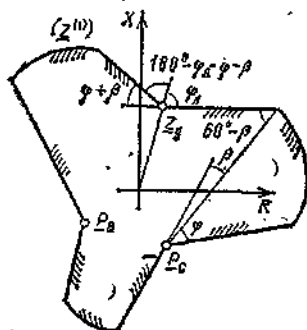


Рис. 73. Характеристика МРС по [20]

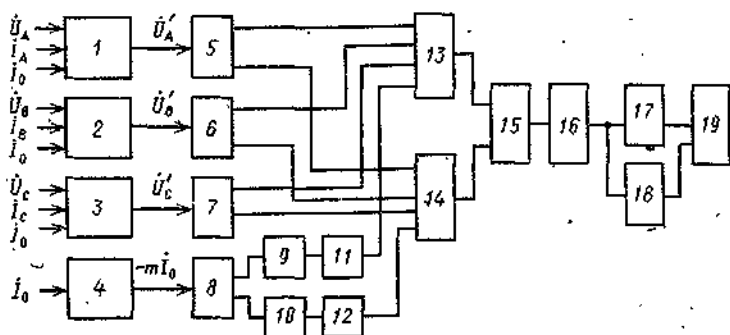


Рис. 74. Структурная схема МРС по разработке института «Энергосетьпроект»

**Выполнение МРС по разработке института «Энергосеть-проект».** Одна из наиболее завершенных разработок симметричного МРС выполнена в ОРЗАУМ института «Энергосеть-проект» и описана в [33]. Структурная схема реле приведена на рис. 74. Назначение отдельных блоков следующее:

блоки 1—4 формируют сравниваемые величины  $U'_a$ ,  $U'_b$ ,  $U'_c$  и  $-mI_0$ ;

блоки 5—8 формируют прямоугольные импульсы шириной  $180^\circ$  на одном выходе при положительном значении входного напряжения, на другом — при отрицательном;

блоки 9—12 изменяют ширину импульсов в цепи величины  $-mI_0$ ;

блоки 13 и 14 (логические элементы И) осуществляют двухполупериодное сравнение фаз входных величин;

блок 15 — логический элемент ИЛИ;

блок 16 — сравнение длительности импульса с заданной;

блок 17 — выходной расширитель импульсов;

блок 18 — отстройка от одиночного ложного импульса на срабатывание;

блок 19 — выходной.

В реле возможны регулировки трех типов.

1) Блок 16 вводит замедление на выходе на  $\gamma=10\div15^\circ$ . Импульсы, которые короче  $\gamma$ , через блок не проходят. Условием срабатывания реле становится нахождение четырех векторов в секторе с углом, меньшим  $(180^\circ-\gamma)$ , т. е. блок 16 придает характеристике реле вид показанной на рис. 71. Действие этого блока эквивалентно сокращению всех импульсов сзади на угол  $\gamma$ . Однако в переходных режимах ввод замедления на выходе более целесообразен, чем сокращение входных импульсов: в случае появления на выходе блока 15 импульса случайной помехи он не пройдет дальше, если его длительность меньше  $\gamma$ .

2) Блоки 9 и 10 замедляют появление переднего фронта импульса, что эквивалентно сдвигу тока  $I_0$  на угол  $e^{-j\beta}$ . Это приводит к наклону линий  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$  характеристики реле.

3) Блоки 11 и 12 определяют ширину импульса от тока  $-mI_0$ , придавая характеристике вид рис. 70,а. Это наиболее действенный способ влияния на функционирование МРС при наложении качаний. Таким образом, МРС по [33] является реле с комбинированной характеристикой, но с дополнительной возможностью сокращения характеристики вводом небольшого замедления на выходе логической части.

Рис. 75. Сочетание симметричного МРС с тремя однофазными блокирующими реле

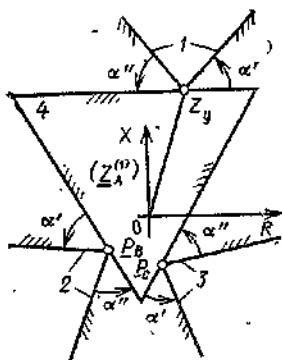
**Блокировка симметричных МРС однофазными реле.** Изменение положения различных граничных линий МРС позволяет существенно улучшить их функционирование при наложении качаний на КЗ.

Однако ясно, что возможности изменения формы характеристики не безграничны. Отстройка от излишних срабатываний идет за счет уменьшения площади характеристики, т. е. приводит к сокращению чувствительности к  $R_n$  и увеличению вероятности отказа при КЗ в зоне.

Более совершенная, хотя и более сложная возможность отстройки от излишних срабатываний, предложена в [39]. Это сочетание симметричного МРС с системой однофазных блокирующих реле. Возможные виды характеристик сочетаемых реле показаны на рис. 75. На рисунке: 1, 2 и 3 — характеристики однофазных блокирующих реле фаз А, В и С; 4 — характеристика многофазного реле (показана треугольная, но возможна любая симметричная). Все четыре реле должны на выходе объединяться логическим элементом И. Принцип действия блокировки состоит в следующем. При внешнем металлическом КЗ фазы А сопротивление  $Z_A^{(1)}$  расположено в области надежного несрабатывания однофазного реле 1 (при любых углах качаний). Это же реле не срабатывает при малых  $R_n$  и при КЗ через большие  $R_n$  при определенных углах между ЭДС (см. рис. 13). В результате не срабатывает все устройство. При замыканиях фаз В и С ту же роль выполняют однофазные реле 2 и 3, так как устройство симметрично. Реле 2 и 3 при КЗ фазы А срабатывают почти всегда (см. рис. 33 и 34).

Конечно, наличие однофазных блокирующих реле не дает полной гарантии отсутствия излишних срабатываний при КЗ через  $R_n$  и может иногда приводить к отказам защиты. Подбором углов  $\alpha'$  и  $\alpha''$  можно свести возможность неправильного функционирования к минимуму.

Угол  $\alpha'$  должен быть на  $10-20^\circ$  меньше угла  $\varphi_n$ , чтобы сопротивление  $Z_A^{(1)}$  при внешнем металлическом КЗ не вышло из характеристики 1 из-за неравенства между действительным и расчетным коэффициентами компенсации



по току  $I_0$ . Но слишком малые величины  $\alpha'$  ограничивают чувствительность к  $R_n$  при КЗ в конце зоны.

Угол  $\alpha''$  не должен быть слишком мал, иначе характеристика 3 ограничит чувствительность устройства к переходным сопротивлениям.

Отметим, что характеристики 3 и 2 изображены в плоскости  $Z_A^{(1)}$ , т. е. их положение на чертеже неоднозначно. Для определения положения граничных линий характеристики следует записать их уравнения в виде скалярного произведения и провести соответствующие преобразования. Например, одна из линий характеристики 2 описывается уравнением

$$[-j(I_B + KI_0)e^{j\omega'}] \cdot [\dot{U}_B] = 0.$$

Проведем преобразования с учетом положений и формул приложений П1, П2 и П4:

$$\begin{aligned} & [-j(I_B + KI_0)e^{j\omega'}] \cdot [\dot{U}_B] = \\ & = \left[ - \left( j \frac{I_0}{I_A + KI_0} \frac{I_B + KI_0}{I_0} e^{j\omega'} \right) \right] \cdot [\alpha^2 (Z_A^{(1)} - P_B)]. \end{aligned}$$

На основании приложений П2 граничная линия проходит через конец вектора  $P_B$  и наклонена к горизонтали под углом

$$90^\circ + \varphi_{CB} = 300^\circ + \alpha + \varphi_B + \alpha',$$

где  $\alpha = \arg(I_0 / (I_A + KI_0))$  (см. формулу (87));

$$\varphi_B = \arg \frac{I_B + KI_0}{I_0} = \arg \left[ \frac{\alpha^2}{C_{op}} \frac{\Sigma Z^{(1)}}{(Z^{(n)} - Z_{кв})} - \frac{C_{1p}}{C_{op}} + K + 1 \right].$$

При  $Z^{(n)} = \infty$  угол  $\varphi_B$  примерно равен нулю. Учитывая, что согласно табл. 21 линия В0 характеристики многофазного реле проходит через ту же точку  $P_B$  под углом  $300^\circ + \alpha$ , заключаем, что угол между двумя рассматриваемыми граничными линиями, равен  $\varphi_B + \alpha'$ . При  $Z^{(n)} = \infty$  углы между линиями характеристики многофазного реле и соответствующими линиями характеристик однофазных реле одинаковы для всех фаз, что и отражено на рис. 75.

**Статистическая оценка симметричных МРС с регулируемой характеристикой.** Результаты расчетов методом статистических испытаний, позволяющие сравнивать функционирование симметричных МРС различных исполнений при однофазных КЗ, приведены в табл. 16. Параметры передач 220 кВ принимались в диапазонах табл. 4, уставки

всех реле равны  $0,85Z_{1л}$ , коэффициент компенсации по току нулевой последовательности равен 2,5. У всех реле принималось, что линии А0, В0, С0 характеристик наклонены к горизонтали под углом, равным  $\beta_л$ . Сравнивались между собой реле Суяра, реле с треугольной характеристикой, реле с трехлучевой характеристикой с углом  $\varphi=30^\circ$ , реле с комбинированной характеристикой с углом  $\varphi=30^\circ$ , сочетания всех перечисленных МРС с однофазными блокирующими реле по рис. 75, причем углы  $\alpha'$  и  $\alpha''$  были приняты равными  $50^\circ$  с горизонталью.

Таблица 16

$\frac{Z_k}{Z_{1л}}$	$R_{дл}$ , Ом	$\beta$ , град	Реле Суяра	Реле с треугольной характеристикой	Реле с трехлучевой характеристикой	Реле с комбинированной характеристикой	МРС с блокировкой однофазными реле		
							Суяра	с треугольной характеристикой	с трехлучевой характеристикой
0÷0,75	0÷30	0÷60	128	168	72	128	129	169	73
		60÷90	230	232	213	230	239	241	222
		0÷-60	121	231	33	121	164	252	98
		-60÷-90	132	356	48	138	256	414	179
	0	0÷60	0	0	0	0	3	3	3
		60÷90	0	0	0	0	18	18	18
		0÷-60	0	0	0	0	0	0	0
		-60÷-90	0	0	0	0	3	3	3
	I	0÷60	0	0	21	0	0	0	4
		60÷90	32	30	299	32	4	4	65
		0÷-60	0	0	0	0	0	0	0
		-60÷-90	3	0	2	2	0	0	0
	0	0÷60	0	0	0	0	0	0	0
		60÷90	3	3	5	3	0	0	0
		0÷-60	34	0	0	0	0	0	0
		-60÷-90	304	0	179	162	0	0	0

В табл. 16 для КЗ в зоне дано число отказов реле (на 1000 испытаний), для КЗ вне зоны — число излишних срабатываний. Согласно данным табл. 16 при КЗ в зоне через переходное сопротивление наименьшее число отказов имеет реле с трехлучевой характеристикой, наибольшее — реле с треугольной характеристикой. При металлических КЗ и углах до  $\pm 90^\circ$  многофазные реле не отказывают.

После ввода блокировки однофазными РС появляется вероятность отказа устройства (до 1,8% при  $\delta=60-90^\circ$ ). Объясняется это возможностью попадания сопротивлений  $Z_B^{(1)}$  и  $Z_C^{(1)}$  в область несрабатывания однофазных РС.

При внешних КЗ через  $R_n$  и положительных углах между ЭДС реле с трехлучевой характеристикой склонно к излишним срабатываниям. Блокирующие однофазные реле при принятых значениях углов  $\alpha'$  и  $\alpha''$  не могут полностью исключить вероятность излишних срабатываний при углах между ЭДС  $60-90^\circ$ , хотя и существенно снижают ее.

При внешних металлических КЗ и положительных углах между ЭДС вероятность излишних срабатываний МРС невелика. Но при отрицательных углах удовлетворительно функционирует только реле с треугольной характеристикой. Полную гарантию отсутствия излишних срабатываний при наложении качаний с рассматриваемыми углами на внешнее однофазное КЗ без переходного сопротивления дает блокировка многофазных реле однофазными.

Реле с комбинированной характеристикой при принятом значении угла  $\varphi$  занимает промежуточное положение между реле Суяра и реле с треугольной характеристикой.

## 20. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ МРС

В алгоритме действия несимметричного МРС электрические величины различных фаз поставлены в неодинаковые условия путем переключений, возможных только после определения вида повреждения или, по крайней мере, после определения особой фазы. Поэтому структура защиты с несимметричным МРС включает в себя само МРС и орган выбора фазы (ВФ), который производит определенные переключения в схеме МРС. Конечно, необходимость выбора фазы существенно усложняет защиту. Поэтому использование несимметричных МРС целесообразно только тогда, когда они дают существенные преимущества перед симметричными.

В качестве органа ВФ могут использоваться либо избиратель особой фазы (ИОФ), либо избиратель поврежденной фазы (ИПФ). В гл. 2 указывалось, что сама проблема выбора фазы достаточно сложна. Особую фазу можно выбрать надежно и с большой чувствительностью к  $R_n$  путем сравнения по углу токов  $I_{2\varphi}$  и  $I_0$ . Поврежденную фазу выбрать сложнее. Но отметим, что к ИПФ, используемому только для переключений, предъявляются гораздо более легкие требования, чем в схемах ОАПВ. В частно-

сти, от них не требуется правильное функционирование в неполнофазном режиме.

Повышение чувствительности защиты к  $R_n$  путем переключений в цепях симметричного МРС. Чувствительность симметричного МРС к  $R_n$  все же ограничена. Но ее можно повысить, если орган ВФ из условия срабатывания МРС исключит компенсированное напряжение фазы, опережающей поврежденную [38]. Пусть, например, МРС выполнено с треугольной характеристикой, т. е. срабатывает

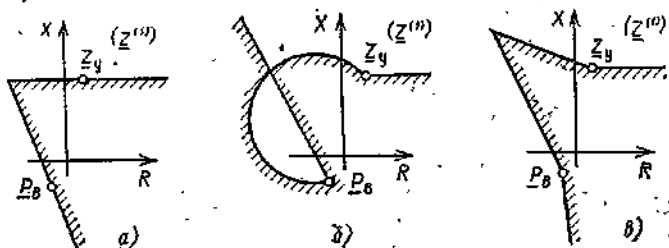


Рис. 76. Характеристики МРС после исключения из условия срабатывания величины  $U'_c$

при отставании  $U'_A$ ,  $U'_B$  и  $U'_C$  от  $I_0$  на угол от 0 до 180°. Если при КЗ фазы А на землю из условия срабатывания исключить компенсированное напряжение  $U'_C$ , то МРС сработает при отставании векторов  $U'_A$  и  $U'_B$  от вектора  $I_0$ . Из характеристики реле исчезает линия  $CO$ , и характеристика приобретает вид показанной на рис. 76,а. После той же операции характеристики реле Суяра и трехлучевого реле приобретают вид показанных на рис. 76,б и 76,в соответственно.

Исключение из условия срабатывания компенсированного напряжения одной из фаз может быть выполнено различными способами. В частности, в схемах рис. 63, 69, 70 для исключения  $U'_f$  необходимо подать на вход  $U'_f$  постоянный отрицательный потенциал.

Характеристики рис. 76 объединяет общая черта — отсутствие ограничения характеристики в первом квадранте плоскости. Все свойства реле с такими характеристиками весьма близки к свойствам РКППН (но, как это будет показано в § 21, реле остаются направленными). В частности, при однофазных КЗ реле приобретают весьма большую чувствительность к  $R_n$  и склонность к излишним срабатываниям при замыканиях через  $R_n$  и положительных углах между ЭДС систем (см. табл. 13). Принципиально последний недостаток может быть устранен вводом бло-



кировки от однофазного реле по схеме, приведенной на рис. 57,б.

При КЗ двух фаз на землю (BC0) ИОФ исключит из условия срабатывания компенсированное напряжение фазы С. Функционирование МРС будет близко к функционированию РКППН фазы В, поскольку РКППН фазы А при КЗ BC0 всегда срабатывает. Из табл. 14 следует, что РКППН фазы В при КЗ BC0 более склонно к излишним срабатываниям, чем многофазные реле. Поэтому при КЗ двух фаз на землю переключений в цепях симметричного МРС лучше не производить. Это возможно, если в схеме используется не ИОФ, но ИПФ, так как в схемах ИПФ всегда имеется орган или возможность определения вида повреждения.

Недостатком многих схем с переключениями является замедление действия защиты на время переключений. Но в МРС с переключениями подобное замедление может отсутствовать. До переключений устройство может действовать на отключение с характеристикой и с собственным временем действия МРС. При металлическом КЗ это и произойдет. И лишь при КЗ через большое  $R_{\Pi}$  действие МРС начнется уже после производства переключений.

Несимметричные переключения уставок. Некоторым недостатком характеристик рис. 76 является их неограниченность вдоль оси активных сопротивлений. Вместе с высокой чувствительностью к  $R_{\Pi}$  устройство приобретает и возможность неправильного функционирования при наложении качаний на КЗ.

Для устранения недостатка желательно после переключений оставить характеристику ограниченной. Одна из возможностей заключается в изменении уставки реле по цепи только одного из компенсированных напряжений.

Схема измерительного органа с подобными переключениями показана на рис. 77. Отличие схемы в том, что благодаря ответвлениям на промежуточных трансформаторах напряжения получены фазные напряжения, компенсированные до двух сопротивлений уставки:

$$U'_{\phi} = U_{\phi} - (I_{\phi} + KI_0)Z'_{\gamma} \text{ и}$$

$$U''_{\phi} = U_{\phi} - (I_{\phi} + KI_0)Z''_{\gamma}.$$

Компенсированные напряжения подводятся к логической части МРС через контакты выходных реле избирающей особой фазы ИОФ. Особым фазам А, В и С соответствует срабатывание реле  $KL1$ ,  $KL2$  или  $KL3$ .

Рис. 77. Многофазное РС с несимметричным переключением уставки

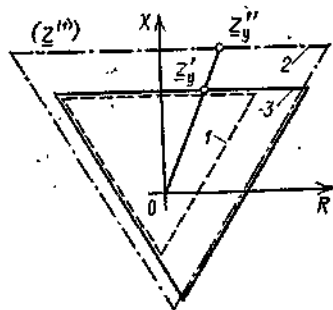
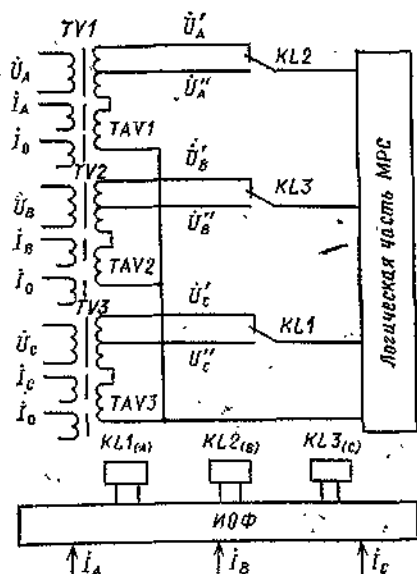


Рис. 78. Характеристики МРС с переключениями уставки



Пока выходные реле ИОФ не сработали, к логической части подведены напряжения  $U'_ф$ , компенсированные до основной уставки  $Z'_y$ . При КЗ с особой фазой *A* сработает реле *KL1* и переключит компенсированное напряжение фазы *C* на большую уставку  $Z''_y$ . Характеристика МРС расширится в первом и четвертом квадрантах.

На рис. 78 показана характеристика для случая, если логическая часть соответствует реле с треугольной характеристикой. Здесь: 1 — характеристика реле до срабатывания ИОФ ( $Z_y = Z'_y$ ); 2 — характеристика в режиме, когда все три выходных реле ИОФ сработали ( $Z_y = Z''_y$ ); 3 — характеристика в случае срабатывания только одного выходного реле *KL1* ( $Z_{yc} = Z''_y$ ,  $Z_{y,a} = Z_{y,b} = Z'_y$ ).

Характеристика 3 имеет увеличенную по сравнению с характеристикой 1 чувствительность к  $R_n$ , но остается ограниченной. Степень расширения характеристики определяется подбором  $Z''_y$ , что позволяет найти оптимальное соотношение между чувствительностью к  $R_n$  и вероятностью излишних срабатываний для каждой конкретной линии.

Несимметричное изменение длительности импульсов, подводимых к логической части МРС. В Рижском политехническом институте (В. А. Шабановым) разработан целый ряд реле, у которых ИОФ воздействует на длитель-

ность импульсов, подводимых к логической части МРС. Сущность такого решения состоит в том, что при КЗ фазы  $A$  следует изменить положение и длительность импульсов от-компенсированных напряжений  $U'_B$  и  $U'_C$  так, чтобы характеристика стала оптимальной: достаточно широкой в первом и четвертом квадрантах и узкой во втором и третьем квадрантах комплексной плоскости. Разработана и методика подбора длительности импульсов для конкретных условий защищаемой линии. Устройства формирования импульсов в МРС получаются довольно сложными, но вполне реализуемыми на современной элементной базе.

Сочетание несимметричных МРС с однофазными блокирующими реле. Для надежной отстройки несимметричного МРС от излишних срабатываний при наложении качаний на внешнее КЗ целесообразно сочетать его с однофазным блокирующим реле, включенным на ток и напряжение поврежденной фазы. Характеристика однофазного реле должна иметь вид прямой 2 рис. 57. Блокировка предполагает необходимость предварительного выбора фазы, но и само использование несимметричных МРС возможно только при наличии органа выбора фазы.

## 21. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МРС ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ В НАПРАВЛЕНИИ, ПРОТИВОПОЛОЖНОМ СРАБАТЫВАНИЮ

О направленности МРС нельзя судить только по виду его характеристики в плоскости  $Z^{(1)}$ . Все приведенные выше характеристики построены для случая замыканий в направлении срабатывания. Даже захват такой характеристикой части третьего и четвертого квадрантов плоскости не свидетельствует о потере направленности. Он свидетельствует лишь о степени чувствительности реле в гипотетическом случае КЗ через емкостное переходное сопротивление.

Для оценки функционирования МРС при КЗ «за спиной» реле следует построить характеристики для такого КЗ. Характеристики в плоскости  $Z^{(1)}$  можно строить по формулам (83) приложения П4. Однако следует учесть, что при КЗ «за спиной» формулы для коэффициентов токораспределения и параметров  $P_B$  и  $P_C$  изменяются. В частности, при однофазном КЗ непосредственно на шинах, у которых установлена защита, формулы (83) приобретают вид:

$$\begin{aligned} C_{1p} &= -Z_{1c}/Z_{11}; \quad C_{0p} = -Z_{0c}/Z_{00}; \\ P_B, P_C &= Z_B + \frac{3(A+B) \pm \sqrt{3}(A-B)}{2[2C_{1p} + (K+1)C_{0p} + \Sigma Z^{(1)}/Z^{(n)}]}; \\ A &= C_{1p}(Z_{11} - Z_{1c} - Z_Y); \quad B = C_{0p}[Z_{00} - Z_{0c} - (K+1)Z_Y]. \end{aligned}$$

Для качественного анализа направленности МРС можно обойтись без построения характеристик. Достаточно воспользоваться упрощенным приемом, предложенным в [23]. Пусть требуется определить вид характеристики реле 1 на передаче рис. 1 при КЗ в точке  $M$  — «за спиной» реле. Зона действия реле кончается в точке  $L$ . Функционирование МРС определяется лишь напряжениями, компенсированными до точки  $L$ , и током нулевой последовательности. Учтем, что при КЗ в точке  $M$  напряжения, компенсированные до точки  $L$ , соответствуют реально существующим в точке  $L$  первичным напряжениям.

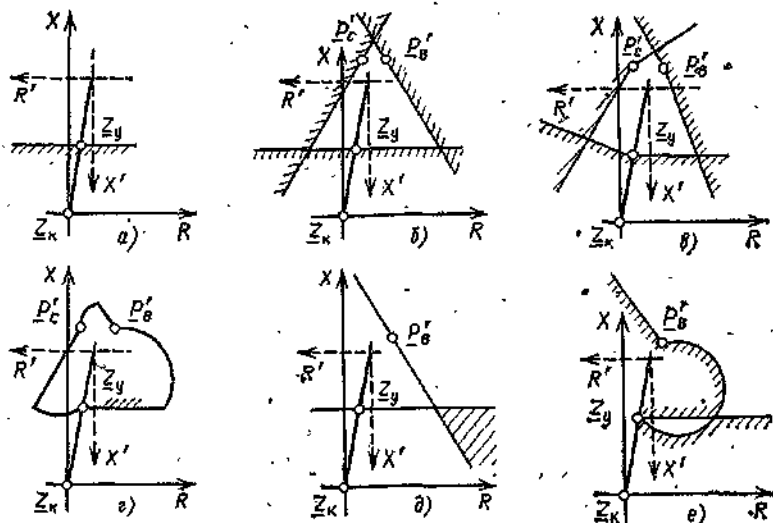


Рис. 79. Характеристики МРС при КЗ «за спиной» реле

Рассмотрим такое же реле 2, установленное у шин  $N$  и имеющее конец зоны в той же точке  $L$ . При КЗ в точке  $M$  функционирование реле 2 определяется теми же первичными напряжениями точки  $L$  и током  $I_0$ , повернутым на  $180^\circ$ , т. е. вместо характеристики реле 1 достаточно рассмотреть характеристику реле 2, для которого КЗ расположено в направлении срабатывания. Следует только помнить, что реле 2 включено с обратной полярностью по току  $I_0$ .

На рис. 79 приведены характеристики некоторых типов МРС при КЗ «за спиной» реле. На каждом рисунке нанесены оси  $R$  и  $X$  плоскости  $Z^{(1)}$  реле 1 и оси  $R'$  и  $X'$  плоскости  $Z^{(1)}$  реле 2. Относительно последних осей построены характеристики реле 2. Реле 1 обладает направленностью, если характеристика не заходит в третий квадрант плоскости  $R, X$ .

Рис. 79,а изображает характеристику РКППН. Граничная линия проходит через точку  $Z_y$ , область срабатывания расположена внизу

из-за обратной полярности тока  $I_0$ . Устройство РКППН не направлено, поскольку точка  $Z_k$  оказалась в области срабатывания.

Рис. 79,б соответствует реле с треугольной характеристикой. Треугольник получен суммированием характеристик РКППН трех фаз. У каждого РКППН область срабатывания перевернута по сравнению с рис. 49. Из рис. 79,б ясно, что на плоскости нет области, соответствующей одновременному срабатыванию всех трех РКППН. Таким образом, реле, имеющее при КЗ в направлении срабатывания треугольную характеристику, при КЗ «за спиной» вообще не имеет характеристики, т. е. является направленным. Аналогично на рис. 79,в построены граничные линии реле с трехлучевой характеристикой. Области, соответствующей срабатыванию реле, тоже нет. Следовательно, направленностью обладают и реле с трехлучевой характеристикой, и реле с комбинированной характеристикой.

На рис. 79,г построена характеристика реле Суяра. При построении учитывалось, что при изменении полярности тока  $I_0$  граничными становятся те лучи линий  $A0$ ,  $B0$ ,  $C0$ , которые изображены на рис. 58 пунктирной линией. Но в целом реле сохраняет характеристику. Область срабатывания расположена выше точки  $Z_y$ , т. е. реле направлено. Положение характеристики свидетельствует о том, что теоретически реле Суяра могло бы потерять направленность при КЗ через емкостное переходное сопротивление.

Рисунки 79,д и 79,е соответствуют реле с треугольной характеристикой и реле Суяра после исключения из их условия срабатывания компенсированного напряжения фазы, опережающей поврежденную.

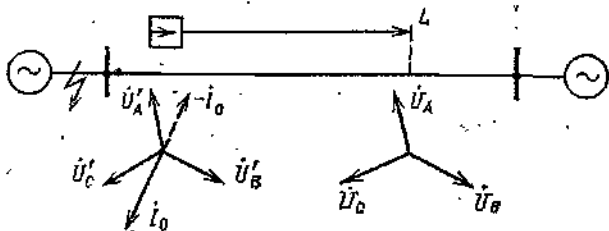


Рис. 80. Векторные диаграммы при КЗ «за спиной» реле

Многофазное МРС с треугольной характеристикой после переключений остается направленным, а реле Суяра теряет направленность.

Причина сохранения направленности МРС с треугольной характеристикой в том, что оно контролирует факт отставания компенсированных напряжений от  $I_0$ , а реле Суяра — не контролирует. На рис. 80 приведены векторные диаграммы электрических величин при КЗ «за спиной» реле. Исключение из диаграммы напряжения  $U'_C$  приведет к срабатыванию реле Суяра ( $U'_A$ ,  $U'_B$  и  $-I_0$  находятся в одной полу-

плоскости), но не вызовет срабатывания реле с треугольной характеристикой ( $U'_{\phi}$  не отстает от  $I_0$ ). Вообще, если в алгоритм функционирования МРС заложена проверка отставания компенсированных напряжений от  $I_0$ , направленность реле улучшается. Путем аналогичных рассуждений можно сделать вывод о направленности реле, имеющих переключения уставок в цепях одной из фаз.

Особый характер направленности МРС упрощает их использование на передачах с установками продольной емкостной компенсации. Известно, что однофазные РС на таких передачах могут терять направленность. С МРС этого не происходит (так же, как с реле А. М. Бреслера).

Примененный выше упрощенный способ оценки направленности прост и нагляден, но ограничен в применении. Его невозможно использовать для реле вторых и резервных ступеней (поскольку у них точка  $L$  лежит за пределами линии), трудно применить для анализа функционирования МРС при наложении качаний на КЗ. Точный и конкретный ответ в каждом случае даст только построение характеристик по общим правилам.

Для количественной оценки и сравнения различных МРС были проведены статистические расчеты количества срабатываний реле из 1000 случаев КЗ на шинах в месте установки МРС. Диапазоны изменения всех параметров передач 220 кВ принимались по табл. 4, переходные сопротивления равномерно распределялись в диапазоне 0—30 Ом. Исследовалось функционирование реле с уставками  $0,1Z_{1л}$ ,  $0,85Z_{1л}$  и  $2,5Z_{1л}$ . Результаты расчетов сведены в табл. 17.

Таблица 17

$Z_y$	Число срабатываний МРС из 1000 случаев КЗ "за синкой"			
	Диапазон углов между ЭДС, град	Реле		
		с треугольной характеристикой	Суяра	с комбинированной характеристикой
$0,1 Z_{1л}$	$\pm (0 \div 60)$	0	93	0
	$\pm (60 \div 120)$	0	124	0
$0,85 Z_{1л}$	$\pm (0 \div 60)$	0	0	0
	$\pm (60 \div 120)$	0	0	0
$2,5 Z_{1л}$	$\pm (0 \div 60)$	8	20	18
	$\pm (60 \div 120)$	3	7	5

Из табл. 17 следует, что реле с уставками первой ступени ( $0,85Z_{1н}$ ) гарантируют направленность при углах по крайней мере до  $\pm 120^\circ$ . Реле резервных ступеней ( $Z_у = 2,5Z_{1н}$ ) имеют небольшую вероятность ненаправленного действия, но это не страшно из-за больших уставок резервных ступеней по времени. Интересно, что реле Суяра с очень малыми уставками ( $Z_у = 0,1Z_{1н}$ ) принципиально может терять направленность. Объясняется это тем, что с уменьшением уставки точка L на рис. 80 приближается к точке КЗ. Цифры табл. 17 для  $Z_у = 0,1Z_{1н}$  можно рассматривать как вероятность излишнего срабатывания реле 2 из-за рис. 1, имеющего  $Z_у = 0,9Z_{1н}$  и ошибочное включение по цели тока  $I_0$ . В этих условиях реле Суяра сохраняет характеристику и имеет вероятность ненаправленного срабатывания.

Однако функционирование МРС со столь малыми уставками представляет лишь теоретический интерес. Вообще же направленность МРС следует считать обеспеченной.

## ПРИЛОЖЕНИЕ П

### ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ СИММЕТРИЧНЫМИ СОСТАВЛЯЮЩИМИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КЗ НА ЗЕМЛЮ

Ниже приводятся выражения для симметричных составляющих токов и напряжений в месте установки дистанционного устройства, найденные для расчетных схем рис. 5 и рис. 81 методом наложения аварийного режима на нагрузочный.

Однофазное КЗ на линии с сосредоточенными параметрами:

$$\begin{aligned} I_1 &= \left( \frac{\Sigma Z^{(1)}}{Z^{(H)} - Z_{1к}} + C_{1р} \right) I_{1к}; \quad \dot{U}_1 = \left( \frac{Z^{(H)} \Sigma Z^{(1)}}{Z^{(H)} - Z_{1к}} - Z_{1с} C_{1р} \right) I_{1к}; \\ I_2 &= C_{2р} I_{1к}; \quad \dot{U}_2 = -C_{2р} Z_{2с} I_{1к}; \\ I_0 &= C_{0р} I_{1к}; \quad \dot{U}_0 = -C_{0р} Z_{0с} I_{1к}. \end{aligned}$$

Здесь:  $C_{nр}$  — коэффициенты токораспределения по схемам последовательностей;  $n$  — символ последовательности;  $Z^{(H)}$  — сопротивление нагрузочного режима в месте установки устройства;  $\Sigma Z^{(1)}$  — суммарное сопротивление схемы замещения аварийного режима однофазного КЗ. Перечисленные параметры определяются формулами:

$$n = 1, 2, 0; \quad C_{nр} = (Z_{nn} - Z_{nc} - Z_{nk}) / Z_{nn};$$

$$Z^{(H)} = \frac{\dot{U}^{(H)}}{I^{(H)}} = \frac{Z_{11}}{1 - p} - Z_{1с}; \quad p = E_2 / E_1;$$

$$\Sigma Z^{(1)} = Z_{1к} + Z_{2к} + Z_{0к} + 3R_n; \quad Z_{2к} = (Z_{nc} + Z_{nk}) C_{2р}.$$

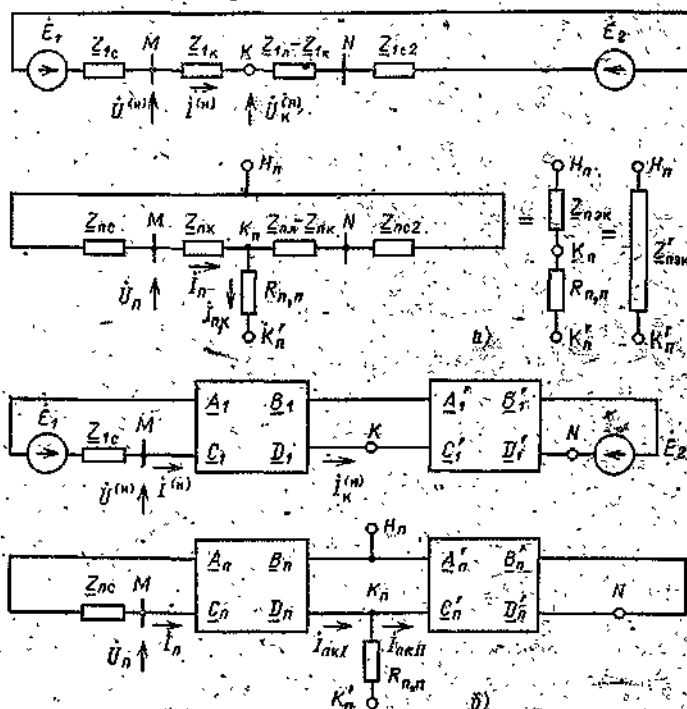


Рис. 81. Схемы замещения короткой (а) и длинной (б) линий

При КЗ двух фаз на землю на линии с сосредоточенными параметрами

$$I_1 = \left( \frac{\Sigma Z^{(1,1)}}{Z^{(H)} - Z_{1K}} + C_{1p} \right) I_{1K}; \quad U_1 = \left( \frac{\Sigma Z^{(1,1)} Z^{(H)}}{Z^{(H)} Z_{1K}} - Z_{1c} C_{1p} \right) I_{1K};$$

$$I_2 = -C_{2p} e_2 I_{1K}; \quad U_2 = Z_{2c} C_{2p} e_2 I_{1K};$$

$$I_0 = -C_{0p} e_0 I_{1K}; \quad U_0 = Z_{0c} C_{0p} e_0 I_{1K}.$$

Здесь:

$$e_2 = Z'_{02K} / (Z'_{22K} + Z'_{02K}); \quad e_0 = 1 - e_2; \\ Z'_{n2K} = Z_{n2K} + R_{nn}; \quad \Sigma Z^{(1,1)} = Z'_{12K} + Z'_{22K} e_2$$

При однофазном КЗ на одной из двух линий, связанных взаимной индукцией в схеме нулевой последовательности (см. рис. 10),

$$I_A = \left( \frac{\Sigma Z^{(1)}}{Z^{(H)} - Z_{1K}} + C_{1p} \right) I_{1K}; \quad U_1 = \left( \frac{\Sigma Z^{(1)} Z^{(H)}}{Z^{(H)} - Z_{1K}} - Z_{1c} C_{1p} \right) I_{1K};$$



$$I_2 = \underline{C}_{2p} I_{1K}; \quad \dot{U}_2 = -\underline{C}_{2pc} \underline{Z}_{2c} I_{1K}; \quad I_0 = \underline{C}_{0p} I_{1K}; \quad \dot{U}_0 = -\underline{C}_{0pc} \underline{Z}_{0c} I_{1K}.$$

Здесь

$$\underline{C}_{npc} = (\underline{Z}_{nn} - \underline{Z}_{nc} - \underline{Z}'_{n\lambda} \underline{Z}_{1\lambda I} / \underline{Z}_{1\lambda I}) / \underline{Z}_{nn};$$

$$\underline{C}_{1p} = \underline{C}_{2p} = (\underline{C}_{1pc} \underline{Z}_{1\lambda II} + \underline{Z}_{1\lambda I} - \underline{Z}_{1K}) / (\underline{Z}_{1\lambda I} + \underline{Z}_{1\lambda II});$$

$$\underline{C}_{0p} = \frac{\underline{C}_{0pc} (\underline{Z}_{0\lambda II} - \underline{Z}_M) + (\underline{Z}_{1\lambda I} - \underline{Z}_{1K}) (\underline{Z}_{0\lambda I} - \underline{Z}_M) / \underline{Z}_{1\lambda I}}{\underline{Z}_{0\lambda I} + \underline{Z}_{0\lambda II} - 2\underline{Z}_M};$$

$$\underline{Z}'_{1\lambda} = \underline{Z}_{1\lambda I} \underline{Z}_{1\lambda II} / (\underline{Z}_{1\lambda I} + \underline{Z}_{1\lambda II});$$

$$\underline{Z}'_{0\lambda} = (\underline{Z}_{0\lambda I} \underline{Z}_{0\lambda II} - \underline{Z}_M^2) / (\underline{Z}_{0\lambda I} + \underline{Z}_{0\lambda II} - 2\underline{Z}_M);$$

$$\underline{Z}_{nn} = \underline{Z}_{nc} + \underline{Z}'_{n\lambda} + \underline{Z}_{nc2};$$

$$\underline{Z}^{(H)} = \left( \frac{\underline{Z}_{11}}{1 - p} - \underline{Z}_{1c} \right) (\underline{Z}_{1\lambda I} + \underline{Z}_{1\lambda II}) / \underline{Z}_{1\lambda II};$$

$$\Sigma \underline{Z}^{(1)} = 2\underline{Z}_{1c} \underline{C}_{1pc} + 2\underline{Z}_{1K} \underline{C}_{1p} + \underline{C}_{0pc} (\underline{Z}_{0c} + \underline{Z}_{1K} \underline{Z}_M / \underline{Z}_{1\lambda I}) + \\ + (\underline{Z}_{0\lambda I} - \underline{Z}_M) \underline{C}_{0p} \underline{Z}_{1K} / \underline{Z}_{1\lambda I} + 3R_n.$$

В приведенных формулах  $\underline{Z}_{\lambda I}$  и  $\underline{Z}_{\lambda II}$  — сопротивления рассматриваемой и параллельной (смежной) линий;  $\underline{Z}_M$  — сопротивление взаимной индукции между линиями.

При однофазном КЗ на одиночной линии с распределенными параметрами

$$I_1 = \left( \frac{\Sigma \underline{Z}^{(1)}}{\underline{D}_1 \underline{Z}^{(H)} - \underline{B}_1} + \underline{C}_{1p} \right) I_{1K}; \quad \dot{U}_1 = \left( \frac{\underline{Z}^{(H)} \Sigma \underline{Z}^{(1)}}{\underline{D}_1 \underline{Z}^{(H)} - \underline{B}_1} - \underline{Z}_{1c} \underline{C}_{1p} \right) I_{1K};$$

$$I_2 = \underline{C}_{2p} I_{1K}; \quad \dot{U}_2 = -\underline{C}_{2pc} \underline{Z}_{2c} I_{1K};$$

$$I_0 = \underline{C}_{0p} I_{0K}; \quad \dot{U}_0 = -\underline{C}_{0pc} \underline{Z}_{0c} I_{1K}.$$

В приведенных формулах:

$$\underline{C}_{np} = \underline{B}'_n / \underline{Z}_{nn}; \quad \underline{Z}_{nn} = \underline{D}''_n (\underline{Z}_{nc} + \underline{Z}_{ncII}) + \underline{B}''_n + \underline{C}''_n \underline{Z}_{nc} \underline{Z}_{nc2};$$

$$\underline{Z}^{(H)} = \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{L}_1 - p} - \underline{Z}_{1c}; \quad \underline{L}_n = \underline{D}''_n + \underline{C}''_n \underline{Z}_{nc2};$$

$$\Sigma \underline{Z}^{(1)} = \underline{Z}_{1K} + \underline{Z}_{2K} + \underline{Z}_{0K} + 3R_n; \quad \underline{Z}_{nK} = \underline{C}_{np} (\underline{D}_n \underline{Z}_{nc} + \underline{B}_n),$$

где  $\underline{B}''_n$ ,  $\underline{C}''_n$ ,  $\underline{D}''_n$  — параметры четырехполюсника, замещающего всю линию.

При КЗ двух фаз на землю на линии с распределенными параметрами

$$I_1 = \left( \frac{\Sigma Z^{(1,1)}}{D_1 Z^{(H)} - B_1} + C_{1p} \right) I_{1K}; \quad I_2 = -C_{2p} I_{1K}; \quad I_0 = -C_{0p} I_{1K};$$

$$\dot{U}_1 = \left( \frac{\Sigma Z^{(1,1)} Z^{(H)}}{D_1 Z^{(H)} - B_1} - Z_{1c} C_{1p} \right) I_{1K};$$

$$\dot{U}_2 = Z_{2c} C_{2p} I_{1K}; \quad \dot{U}_0 = Z_{0c} C_{0p} I_{1K}.$$

Все формулы для двухфазных КЗ на землю верны и для двухфазных КЗ без земли, если принять  $R_{0n} = \infty$ , т. е.  $\varepsilon_0 = 1$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ П2

### ПОСТРОЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ ЛИНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ В ПЛОСКОСТИ ОБЩЕГО ПАРАМЕТРА

Часто приходится строить характеристики устройств в плоскости некоторого общего параметра  $F_{об}$ , в качестве которого могут приниматься  $Z^a$ ,  $Z^{(1)}$ ,  $B_2/B_1$  и т. д. Для построения целесообразно использовать метод [22]. Вначале уравнение граничной линии записывается в виде равенства нулю скалярного произведения двух электрических величин. Для построения граничной линии вида  $[A] \cdot [B] = 0$ , уравнение преобразуется таким образом, чтобы оба сомножителя стали явными функциями от  $F_{об}$ . Если оба сомножителя зависят от общего параметра, то уравнение граничной линии приобретает вид

$$[A] \cdot [B] = [E_{AB} (F_{об} - F_A)] \cdot [F_{об} - F_B] = 0. \quad (78)$$

Если от общего параметра зависит лишь один из сомножителей, то уравнение граничной линии имеет вид

$$[A] \cdot [B] = [-F_{CB}] \cdot [F_{об} - F_B] = 0. \quad (79)$$

Согласно [22] граничная линия, описываемая уравнением (78), представляет собой окружность на плоскости  $F_{об}$ , проходящую через концы векторов  $F_A$  и  $F_B$ . Центр окружности лежит на пересечении перпендикуляра, проведенного через середину вектора  $(F_A - F_B)$ , с прямой, проведенной из конца вектора  $F_B$  под углом  $\varphi_{AB} = \arg F_{AB}$  к вектору  $(F_A - F_B)$ , как это показано на рис. 82. Если уравнения записаны так, что условиям срабатывания реле соответствует положительное значение скалярного произведения, то при  $90^\circ > \varphi_{AB} > -90^\circ$  область сра-

бывания реле лежит вне окружности, при  $90^\circ < \varphi_{AB} < 270^\circ$  — внутри.

Граничная линия, описываемая уравнением (79), представляет собой прямую (рис. 83), проходящую через конец вектора  $F_B$  под углом  $(90^\circ + \varphi_{CB})$  к горизонтالي. Область действия реле лежит слева от прямой, если  $90^\circ > \varphi_{CB} > -90^\circ$ , и справа от прямой, если  $90^\circ < \varphi_{CB} < 270^\circ$ .

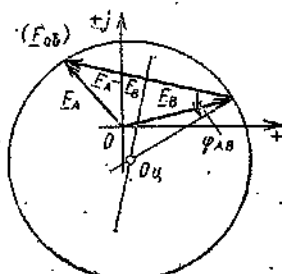


Рис. 82. Построение граничной линии в виде окружности

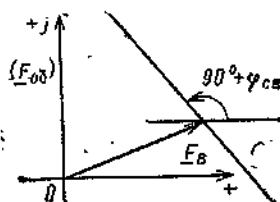


Рис. 83. Построение граничной линии в виде прямой

Для определения, какая часть граничной линии соответствует нахождению величин в противофазе, в [23] найдены следующие правила:

а) линия в виде окружности по уравнению (78) делится концами векторов  $F_A$  и  $F_B$  на две, в общем случае неравные дуги (рис. 82). Если угол  $\varphi_{AB}$  лежит в пределах  $0^\circ < \varphi_{AB} < 180^\circ$ , то длинная дуга окружности соответствует совпадению векторов  $A$  и  $jB$  по фазе, а короткая дуга соответствует нахождению векторов в противофазе. Если  $-180^\circ < \varphi_{AB} < 0^\circ$ , то совпадению векторов  $A$  и  $jB$  соответствует короткая дуга, а нахождению в противофазе — длинная;

б) линия в виде прямой по уравнению (79) делится концом вектора  $F_B$  на два луча. Если  $0^\circ < \varphi_{CB} < 180^\circ$ , то нахождению векторов  $A$  и  $jB$  в противофазе соответствует правый луч (рис. 83), а если  $-180^\circ < \varphi_{CB} < 0^\circ$ , нахождению векторов в противофазе соответствует левый луч.

## ПРИЛОЖЕНИЕ ПЗ

### РАСЧЕТНЫЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ЗАЖИМАХ РЕЛЕ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЦИКЛА ОАПВ

Для определения сопротивлений на зажимах РС  $Z = U_\phi / (I_\phi + KI_0)$  можно пользоваться приведенными ниже выражениями. При их выводе принята расчетная схема одиночной линии по рис. 5. Для всех эле-

Таблица 18

Режим	A	B	C	D
Однофазное по рис. 31, а	$m \Sigma Z^{(1)} - Z_{oc} C_{op} -$ $- n Z_{1c} C_{1p}$	$(n Z_{1c} C_{1p} + Z_{oc} C_{op}) Z_{1c}$	$n C_{1p} + (K+1) C_{op}$	$m \Sigma Z^{(1)} - n Z_{1c} C_{1p} -$ $-(K+1) Z_{1c} C_{op}$
Неполнофазный режим по рис. 31, з	$m(Z_{11} + 2Z_{oc})$	$n Z_{oc} Z_{1c} + Z_{11} Z_{oc}$	0	$n Z_{11} + (m - m^3) Z_{oc} -$ $-(K+1) Z_{11}$
Каскадное от- ключение фазы по рис. 31, б	$\frac{m}{L} -$ $\frac{n Z_{1c} - 2 Z_{oc}}{n - 2(K+1)}$	$[(1 + 2H) Z_{oc} - n H Z_{1c}] / L +$ $+\frac{n Z_{1c} - 2 Z_{oc}}{n - 2(K+1)} Z_{1c}$	1	$[m + n H - (K+1) \times$ $\times (1 + 2H)] / L + Z_{1c}$
Каскадное от- ключение фазы по рис. 31, в	$m \Sigma Z^{(1)} + S$	$\Sigma Z^{(1)} [(1 + R) Z_{oc} +$ $+ n Z_{1c} G] - S Z_{1c}$	$C^K$	$\Sigma Z^{(1)} [m - a G -$ $-(K+1)(1 + R)] - C^K Z_{1c}$

ментов схемы сопротивления прямой и обратной последовательностей считаются равными между собой.

В доаварийном или послеаварийном режимах сопротивления на зажимах реле трех фаз равны между собой и определяются как сопротивление нагрузочного режима:

$$\underline{Z}^{(n)} = \frac{\underline{Z}_{11}}{1 - p} - \underline{Z}_{1c} \quad (80)$$

Для режимов КЗ на фазе А, каскадного отключения фазы А, неполнофазного с отключением фазы А может быть дана единая формула

$$\underline{Z} = \frac{\underline{AZ}^{(n)} + \underline{B}}{\underline{CZ}^{(n)} + \underline{D}} \quad (81)$$

Значения коэффициентов  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$  и  $\underline{D}$  сведены в табл. 18.

В табл. 18:  $\underline{m} = 1$ ,  $a^2$  или  $a$  для фаз А, В или С соответственно,  $\underline{n} = \underline{m} + \underline{m}^2$ ;

$$\underline{L} = \{(\underline{C}_{0p}\underline{Z}_{00} - \underline{C}_{1p}\underline{Z}_{11})[2(K+1) - \underline{n}]\}/\underline{Q1};$$

$$\underline{H} = [-\Sigma \underline{Z}^{(1)}\underline{Z}_{00} - \underline{Z}_{11}\underline{Z}_{00}\underline{C}_{1p}(2\underline{C}_{1p} + \underline{C}_{0p})]/\underline{Q1};$$

$$\underline{Q1} = \Sigma \underline{Z}^{(1)}(\underline{Z}_{00} + \underline{Z}_{11}) + \underline{Z}_{11}\underline{Z}_{00}(2\underline{C}_{1p} + \underline{C}_{0p})^2;$$

$$\underline{G} = [\underline{Z}_{00}\Sigma \underline{Z}^{(1)} + \underline{Z}_{00}\underline{Z}_{11}(-\underline{C}_{1p})(3 - 2\underline{C}_{1p} - \underline{C}_{0p})]/\underline{Q2};$$

$$\underline{R} = [-2\Sigma \underline{Z}^{(1)}\underline{Z}_{00} - \underline{Z}_{11}\underline{Z}_{00}(3 - 2\underline{C}_{1p})(3 - 2\underline{C}_{1p} - \underline{C}_{0p})]/\underline{Q2};$$

$$\underline{Q2} = \Sigma \underline{Z}^{(1)}(2\underline{Z}_{00} + \underline{Z}_{11}) + \underline{Z}_{11}\underline{Z}_{00}(3 - 2\underline{C}_{1p} - \underline{C}_{0p})^2;$$

$$\underline{S} = -\underline{n}\underline{Z}_{1c}[\underline{G}(3 - 2\underline{C}_{1p} - \underline{C}_{0p}) + \underline{C}_{1p}] - \underline{Z}_{0c}[\underline{R}(3 - 2\underline{C}_{1p} - \underline{C}_{0p}) + 3 - 2\underline{C}_{1p}];$$

$$\underline{C}^K = [\underline{n} \cdot 2\underline{G} - 2(K+1)(\underline{R}+1)](1 - \underline{C}_{1p}) + K+1 + \underline{n}\underline{C}_{1p} + [\underline{G}\underline{n} + (K+1)\underline{R}](1 - \underline{C}_{0p}).$$

Таблица 19

Формула	Окружность $p=\text{const}$		Окружность $\delta=\text{const}$	
	$\text{ОО}_{II}$	$R$	$\text{ОО}_{II}$	$R$
(80)	$\frac{\underline{Z}_{11}}{1-p^2} - \underline{Z}_{1c}$	$\frac{p\underline{Z}_{11}}{1-p^2}$	$\underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{1c} + j \frac{\underline{Z}_{11}e^{j\delta}}{2 \sin \delta}$	$\frac{\underline{Z}_{11}}{2 \sin \delta}$
(81)	$\underline{N} + \frac{\underline{F}}{1- \underline{pM} ^2}$	$\frac{p\underline{FM}}{1- \underline{pM} ^2}$	$\underline{N} + \underline{F} + j \frac{\underline{F}e^{j(\delta+\arg M)}}{2 \sin(\delta+\arg M)}$	$\frac{\underline{F}}{2 \sin(\delta+\arg M)}$

При изменении соотношения ЭДС только по величине ( $\delta = \text{const}$ ) или только по углу ( $p = \text{const}$ ) сопротивление, определяемое по (80) или (81), перемещается в плоскости  $Z$  по окружности. Параметры окружности (расстояние от начала координат до центра  $OO_n$  и радиус  $R$ ) можно найти по выражениям табл. 19. В таблице использованы обозначения:

$$\begin{aligned} N &= (\underline{AZ}_{1c} - \underline{B}) / (\underline{CZ}_{1c} - \underline{D}); \\ M &= (\underline{CZ}_{1c} - \underline{D}) / [\underline{C}(\underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{1c}) + \underline{D}]; \\ P &= [\underline{A}(\underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{1c}) + \underline{B}] / [\underline{C}(\underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{1c}) + \underline{D}] - N. \end{aligned}$$

#### ПРИЛОЖЕНИЕ П4

##### НАХОЖДЕНИЕ ОСОБЫХ ТОЧЕК И ЛИНИЙ ПЛОСКОСТИ $Z^{(1)}$ ПРИ ОДНОФАЗНОМ КЗ

Большинство граничных линий характеристик многофазных реле соответствуют условиям совпадения по фазе или нахождения в противофазе двух величин из числа  $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C, I_0$ . Иногда одна из величин сдвигается по фазе на угол  $\psi$ .

Для построения граничных линий следует определить особые точки плоскости (точки, в которых обращается в нуль одна из сравниваемых величин) и найти параметры граничных линий. Для этого вначале выразим сравниваемые величины в виде функций от  $Z^{(1)} = \dot{U}_A / (I_A + KI_0)$  при однофазном КЗ фазы  $A$ :

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A - (I_A + KI_0)Z_y = (I_A + KI_0)[Z^{(1)} - Z_y];$$

$$\begin{aligned} \dot{U}'_B &= a^2(\dot{U}'_1 + a\dot{U}'_2 + a^2\dot{U}'_0) = a^2[\dot{U}'_A + (a^2 - 1)\dot{U}'_2 + (a - 1)\dot{U}'_0] = \\ &= a^2(I_A + KI_0) \left[ Z^{(1)} - Z_y + \frac{(a^2 - 1)\dot{U}'_2 + (a - 1)\dot{U}'_0}{I_A + KI_0} \right]; \end{aligned}$$

$$\dot{U}'_C = a(I_A + KI_0) \left[ Z^{(1)} - Z_y + \frac{(a - 1)\dot{U}'_2 + (a^2 - 1)\dot{U}'_0}{I_A + KI_0} \right].$$

Или

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}'_A &= (I_A + KI_0)[Z^{(1)} - Z_y]; \\ \dot{U}'_B &= a^2(I_A + KI_0)[Z^{(1)} - \underline{P}_B]; \\ \dot{U}'_C &= a(I_A + KI_0)[Z^{(1)} - \underline{P}_C]; \end{aligned} \right\} \quad (82)$$

где параметры  $\underline{P}_B$  и  $\underline{P}_C$  равны

$$\left. \begin{aligned} \underline{P}_B, \underline{P}_C &= Z_y - \frac{3(A + B) \pm \sqrt{3}(A - B)}{2 \left[ \underline{C}_{1p} + (K + 1)\underline{C}_{0p} + \frac{\Sigma Z^{(1)}}{Z^{(1)} - Z_{1c}} \right]}; \\ A &= (\underline{Z}_{1c} + Z_y)\underline{C}_{1p}; \quad B = [\underline{Z}_{0c} + (K + 1)Z_y]\underline{C}_{0p}. \end{aligned} \right\} \quad (83)$$

причем знак «+» соответствует параметру  $\underline{P}_B$ , знак «-» —  $\underline{P}_C$ . Из (82) видно, что если  $\underline{Z}^{(1)}$  равно  $\underline{Z}_Y$ ,  $\underline{P}_B$  или  $\underline{P}_C$ , то обращается в нуль одно из компенсированных фазных напряжений. Аналогично можно найти формулы для компенсированных междуфазных напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}'_{AB} &= \underline{U}'_A - \underline{U}'_B = (1 - a^2)(I_A + KI_0)[\underline{Z}^{(1)} - \underline{P}_{AB}]; \\ \underline{U}'_{BC} &= \underline{U}'_B - \underline{U}'_C = (a^2 - a)(I_A + KI_0)[\underline{Z}^{(1)} - \underline{P}_{BC}]; \\ \underline{U}'_{CA} &= \underline{U}'_C - \underline{U}'_A = (a - 1)(I_A + KI_0)[\underline{Z}^{(1)} - \underline{P}_{CA}]. \end{aligned} \right\} \quad (84)$$

причем параметры  $\underline{P}_{AB}$ ,  $\underline{P}_{BC}$ ,  $\underline{P}_{CA}$  определяются формулами

$$\left. \begin{aligned} \underline{P}_{AB} &= (\underline{Z}_Y - a^2 \underline{P}_B) / (1 - a^2); \\ \underline{P}_{BC} &= (a^2 \underline{P}_B - a \underline{P}_C) / (a^2 - a); \\ \underline{P}_{CA} &= (a \underline{P}_C - \underline{Z}_Y) / (a - 1). \end{aligned} \right\} \quad (85)$$

Таблица 20

Граница	$\varphi_{AB}$	$\underline{F}_A$	$\underline{P}_B$
$[\underline{U}'_A e^{j\gamma}] \cdot [-j \underline{U}'_B] = 0$	$\gamma - 150^\circ$	$\underline{Z}_Y$	$\underline{P}_B$
$[\underline{U}'_B e^{j\gamma}] \cdot [-j \underline{U}'_C] = 0$	$\gamma - 150^\circ$	$\underline{P}_B$	$\underline{P}_C$
$[\underline{U}'_C e^{j\gamma}] \cdot [-j \underline{U}'_A] = 0$	$\gamma - 150^\circ$	$\underline{P}_C$	$\underline{Z}_Y$

Таблица 21

Граница	$90^\circ + \varphi_{CB}$	$\underline{F}_B$
$[-j I_0 e^{j\gamma}] \cdot [\underline{U}'_A] = 0$	$180^\circ + \alpha + \gamma$	$\underline{Z}_Y$
$[-j I_0 e^{j\gamma}] \cdot [\underline{U}'_B] = 0$	$300^\circ + \alpha + \gamma$	$\underline{P}_B$
$[-j I_0 e^{j\gamma}] \cdot [\underline{U}'_C] = 0$	$60^\circ + \alpha + \gamma$	$\underline{P}_C$

Примечание:

$$\alpha = \arg \frac{\underline{C}_{op}}{2 \underline{C}_{1p} + (K + 1) \underline{C}_{op} + \frac{\Sigma \underline{Z}^{(1)}}{\underline{Z}^{(H)} - \underline{Z}_{1K}}} \quad (87)$$

Особыми линиями плоскости  $Z^{(1)}$  назовем граничные линии, вдоль которых совпадают по фазе или находятся в противофазе две сравниваемые величины. С учетом, что одна из сравниваемых величин может быть сдвинута на угол  $\gamma$ , уравнения особых линий имеют вид следующих скалярных произведений:

$$\left. \begin{aligned} [\dot{U}'_A e^{j\gamma}] \cdot [-j\dot{U}'_B] &= 0; [\dot{U}'_B e^{j\gamma}] \cdot [-j\dot{U}'_C] = 0; \\ [\dot{U}'_C e^{j\gamma}] \cdot [-j\dot{U}'_A] &= 0; \\ [-jI_0 e^{j\gamma}] \cdot [\dot{U}'_A] &= 0; [-jI_0 e^{j\gamma}] \cdot [\dot{U}'_B] = 0; \\ [-jI_0 e^{j\gamma}] \cdot [\dot{U}'_C] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (86)$$

Для построения этих линий на плоскости  $Z^{(1)}$  следует привести скалярные произведения к виду (78) или (79). Покажем последовательность приведения на двух примерах:

$$\begin{aligned} [\dot{U}'_A e^{j\gamma}] \cdot [-j\dot{U}'_B] &= [e^{j\gamma}(\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_y)] \cdot [-ja^2(\underline{Z}^{(1)} - \underline{P}_B)] = \\ &= [e^{j(\gamma-180^\circ)}(\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_y)] \cdot [\underline{Z}^{(1)} - \underline{P}_B]; \end{aligned}$$

$$[-jI_0 e^{j\gamma}] \cdot [\dot{U}'_A] = \left[ \frac{-jI_0 e^{j\gamma}}{I_A + KI_0} \right] \cdot [\underline{Z}^{(1)} - \underline{Z}_y].$$

В результате подобных преобразований найдены и сведены в табл. 20 и 21 параметры всех особых линий. В табл. 20 приведены параметры граничных линий, соответствующих совпадению по фазе или нахождению в противофазе компенсированных напряжений. В табл. 21 — параметры граничных линий, соответствующих совпадению по фазе или нахождению в противофазе тока  $I_0 e^{j\gamma}$  с компенсированным напряжением. Пример расположения особых точек и линий на плоскости приведен на рис. 58.

## ПРИЛОЖЕНИЕ П5

### АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МРС В ПЛОСКОСТИ $K_1$ И КОНФОРМНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ОСЕЙ ПЛОСКОСТИ $K_1$ НА ПЛОСКОСТЬ $Z^{(1)}$

В [9] анализ МРС ведется в плоскости отношения тока нагрузочного режима к аварийному току прямой последовательности

$$K_1 = I^{(1)} / I^{(ав)},$$

Как показано В. А. Шабановым, весьма эффективен перенос осей плоскости  $K_1$  на плоскость  $Z^{(1)}$ , который позволяет по характеристикам



МРС в плоскости  $Z^{(1)}$  оценить функционирование МРС в условиях наложения качаний на КЗ. Рассмотрим основные свойства плоскости  $K_i$ .

Представим ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  через  $I^{(n)}$  и  $I^{(ab)}$ . На основании рис. 81,а

$$\dot{E}_1 = I^{(n)}(\underline{Z}_{1c} + \underline{Z}_{1k}) + \dot{U}_k^{(n)} = I^{(n)}(\underline{Z}_{1c} + \underline{Z}_{1k}) + I^{(ab)} \frac{\Sigma Z^{(1)}}{C_{1p}};$$

$$\dot{E}_2 = -I^{(n)}(\underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{1c} - \underline{Z}_{1k}) + I^{(ab)} \Sigma Z / C_{1p};$$

откуда

$$\frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} = \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_1} \frac{q - \underline{K}_i}{\underline{K}_i - n}, \quad (88)$$

где

$$\underline{Z}_1 = (\underline{Z}_{1c} + \underline{Z}_{1k}); \quad \underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{11} - \underline{Z}_1; \quad (89)$$

$$q = \frac{\Sigma Z^{(1)}}{C_{1p} \underline{Z}_{11}}; \quad n = -\frac{\Sigma Z^{(1)}}{C_{1p} \underline{Z}_1}. \quad (90)$$

Выражение (88) показывает, что каждой точке плоскости  $K_i$  соответствует определенное соотношение ЭДС  $\dot{E}_2/\dot{E}_1$ . Для нахождения этого соотношения следует найти по (90) положение точек  $q$  и  $n$ . Затем текущую точку  $\underline{K}_i$  следует соединить с точками  $q$  и  $n$ . Отношение модулей ЭДС пропорционально величинам  $|\underline{Z}_1(\underline{K}_i - n)|$  и  $|\underline{Z}_{11}(q - \underline{K}_i)|$ . Угол между ЭДС равен

$$\delta = \arg(\underline{Z}_{11}/\underline{Z}_1) + \arg \frac{q - \underline{K}_i}{\underline{K}_i - n}. \quad (91)$$

При упрощенных расчетах  $\arg(\underline{Z}_{11}/\underline{Z}_1) \approx 0$  и углы между ЭДС могут быть измерены непосредственно на плоскости как углы между векторами  $(q - \underline{K}_i)$  и  $(\underline{K}_i - n)$ . Построение характеристик МРС в плоскости  $K_i$  показывает, что они повторяют в определенном масштабе характеристики в плоскости  $Z^{(1)}$ , построенные для случая  $Z^{(n)} = \infty$ . Для доказательства рассмотрим, как переходят с плоскости  $Z^{(1)}$  на плоскость  $K_i$  три узловые точки характеристик:  $\underline{P}_A$ ,  $\underline{P}_B$  и  $\underline{P}_C$ .

В соответствии с (82) и (83) координаты точек  $\underline{P}$  в плоскости  $Z^{(1)}$  при  $Z^{(n)} = \infty$  определяются единой формулой

$$\underline{P}_{A, B, C} = \underline{Z}_y - \frac{(a^l - 1)C_{1p}(\underline{Z}_{1c} + \underline{Z}_y) + (a^m - 1)C_{op}[\underline{Z}_{oc} + (K+1)\underline{Z}_y]}{C}, \quad (92)$$

где  $j=0, 2, 1$  для фаз  $A, B$  и  $C$ ;  $m=0, 1, 2$  для тех же фаз;  $\underline{C}=2C_{1p} + (K+1)C_{0p}$ .

В точках  $P$  обращаются в нуль компенсированные напряжения трех фаз. Найдем выражения для точек  $N_A, N_B$  и  $N_C$  плоскости  $K_i$ , в которых обращаются в нуль те же напряжения. При этом учтем, что токи и напряжения при однофазном КЗ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} I_1 &= (1 + K_i) \underline{C}_{1p} I_{0k}; & U_1 &= [\Sigma Z^{(1)} + K_i \underline{C}_{1p} \underline{Z}_{1k} - \underline{C}_{1p} \underline{Z}_{1c}] I_{0k}; \\ I_2 &= \underline{C}_{1p} I_{0k}; & U_2 &= -\underline{C}_{1p} I_{0k} \underline{Z}_{1c}; \\ I_0 &= \underline{C}_{0p} I_{0k}; & U_0 &= -\underline{C}_{0p} I_{0k} \underline{Z}_{0c}. \end{aligned}$$

С учетом сказанного выражения для компенсированных напряжений фаз приобретают вид

$$\underline{U}'_{A,B,C} = a^j I_{0k} \underline{C}_{1p} (\underline{Z}_{1k} - \underline{Z}_y) [\underline{K}_i - \underline{N}_{A,B,C}], \quad (93)$$

где

$$\underline{N}_{A,B,C} = \frac{\underline{C} \underline{P}_{A,B,C} - \underline{C} \underline{Z}_y - 2 \underline{C}_{1p} (\underline{Z}_{1k} - \underline{Z}_y) - \underline{C}_{0p} [\underline{Z}_{0k} - (K+1) \underline{Z}_y]}{\underline{C}_{1p} (\underline{Z}_{1k} - \underline{Z}_y)} \quad (94)$$

Выражение (94) производит конформное преобразование трех точек плоскости  $Z^{(1)}$  в три точки плоскости  $K_i$ . Формулу обратного преобразования определяем, решая (94) относительно  $\underline{P}_{A,B,C}$ :

$$\underline{P}_{A,B,C} = \frac{2 \underline{C}_{1p} \underline{Z}_{1k} + \underline{C}_{0p} \underline{Z}_{0k}}{\underline{C}} + \frac{3R_{\Pi}}{\underline{C}} + \frac{\underline{C}_{1p}}{\underline{C}} (\underline{Z}_{1k} - \underline{Z}_y) \underline{N}_{A,B,C}. \quad (95)$$

В случае точной компенсации по току нулевой последовательности  $\frac{\underline{Z}_{0k}}{\underline{Z}_{1k}} = K+1$  и формула упрощается:

$$\underline{P}_{A,B,C} = \underline{Z}_{1k} + \frac{3R_{\Pi}}{\underline{C}} + \frac{\underline{C}_{1p}}{\underline{C}} (\underline{Z}_{1k} - \underline{Z}_y) \underline{N}_{A,B,C}. \quad (96)$$

Преобразования (95) и (96) линейные и переводят три точки плоскости  $K_i$  на плоскость  $Z^{(1)}$ . Следовательно, они переводят и все другие точки, линии и характеристики. Линейность преобразования обеспечивает сохранение всех углов. Поэтому предложено вместо преобразования характеристики переносить на плоскость только особые точки  $n$  и  $q$ , что позволит затем найти соответствующее любой точке соотно-

шение ЭДС. Производя подстановку в (95) координат точек  $\underline{n}$  и  $\underline{q}$ , из (90), определяем положение этих точек на плоскости  $\underline{Z}^{(1)}$ :

$$\underline{n}^{(1)} = \underline{Z}_{\kappa, 3}^{(1)} + \frac{\Sigma \underline{Z}^{(1)}}{\underline{C}} \frac{\underline{Z}_y - \underline{Z}_{1\kappa}}{\underline{Z}_I}, \quad (97)$$

$$\underline{q}^{(1)} = \underline{Z}_{\kappa, 3}^{(1)} - \frac{\Sigma \underline{Z}^{(1)}}{\underline{C}} \frac{\underline{Z}_y - \underline{Z}_{1\kappa}}{\underline{Z}_{II}}, \quad (98)$$

где

$$\underline{Z}_{\kappa, 3}^{(1)} = \frac{2C_{12}\underline{Z}_{1\kappa} + C_{0p}\underline{Z}_{0\kappa} + 3R_{\Pi}}{\underline{C}} \approx \underline{Z}_{1\kappa} + \frac{3R_{\Pi}}{\underline{C}}$$

— сопротивление на зажимах реле фазы А при однофазном КЗ с  $\underline{Z}^{(1)} = \infty$ .

По точкам  $\underline{n}^{(1)}$  и  $\underline{q}^{(1)}$  несложно построить линию, соответствующую постоянству модуля отношения ЭДС:  $p = \text{const}$ . Это окружность, расстояния от любой точки которой до точек  $\underline{n}^{(1)}$  и  $\underline{q}^{(1)}$  пропорциональны

$$p = \left| \frac{\underline{Z}_{II}}{\underline{Z}_I} \right| \left| \frac{\underline{q}^{(1)} - \underline{Z}^{(1)}}{\underline{Z}^{(1)} - \underline{n}^{(1)}} \right|. \text{ Обозначим } m = p \frac{\underline{Z}_I}{\underline{Z}_{II}}. \text{ Тогда из}$$

элементарных геометрических соображений следует, что центр окружности лежит на прямой, соединяющей точки  $\underline{n}^{(1)}$  и  $\underline{q}^{(1)}$ . Радиус окружности равен

$$R = \frac{m}{m^2 - 1} |\underline{n}^{(1)} - \underline{q}^{(1)}|. \quad (99)$$

Окружность проходит через точку  $\underline{Z}^{(1)}_{\kappa, 3}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А. М. Релейная защита электроэнергетических систем: Релейная защита сетей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
2. А. с. 582929 (СССР). Устройство дистанционной защиты/ В. К. Ванин, А. И. Сафонов, А. И. Таджикибаев. Оpubл. в Б. И., 1977, № 39.
3. Аржанников Е. А. Работа реле сопротивления в условиях замыкания на землю на линии с сосредоточенными параметрами. — Изв. вузов, Энергетика, 1970, № 8, с. 1—6.
4. Чернин А. Б. Вычисление электрических величин и поведение релейной защиты при неполнофазных режимах в электрических системах. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1963. 416 с.
5. Аржанников Е. А. О взаимном согласовании элементов двухэлементного реле выбора поврежденной фазы устройства ОАПВ. — Электрические станции, 1973, № 10, с. 57—60.
6. Современная релейная защита (доклады СИГРЭ, 1968). М.: Энергия, 1970, 240 с.
7. Атабеков Г. И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1957. 344 с.
8. Рубинчик В. А. Исследование вопросов осуществления дистанционной защиты от коротких замыканий на землю. — Автореферат диссертации МЭИ, 1975. 41 с.
9. Фабрикант В. Л. Дистанционная защита. М.: Высшая школа, 1978. 216 с.
10. Фабрикант В. Л., Шабанов В. А., Шнейдер Я. А. Выбор уставок дистанционной защиты от коротких замыканий на землю. — Электричество, 1978, № 2, с. 18—21.
11. Саухатас А.-С. С., Фабрикант В. Л., Шабанов В. А. Многофазные реле сопротивления и их сопоставление методом статистических испытаний. — Электричество, 1983, № 10, с. 45—49.
12. Айзенфельд А. И., Шалыт Г. М. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями. М.: Энергия, 1977. 208 с.
13. Фейст П. К. Исследование работы дистанционных реле методом круговых диаграмм в комплексной плоскости полных сопротивлений. — Тр. ЦНИЭЛ, 1953, вып. 1, с. 41—88.
14. Чернин А. Б., Лосев С. Б. Основы вычислений электрических величин для релейной защиты при сложных повреждениях в электрических системах. М.: Энергия, 1971. 440 с.
15. Adamson C., Turely A. Errors of sound—phase compensation and residual compensation systems in earth—fault distance relaying. — Proceedings IEE, Vol. 112, № 7, 1965, p. 1369—1382.
16. Руководящие указания по релейной защите. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110—750 кВ. М.: Энергия, 1979. 152 с.
17. Wedepohl L. M., Mohamed S. E. T. Apparent impedances of very long transmission lines. — Proceedings IEE, Vol. 117, № 7, 1970.

18. А. с. 286054 (СССР). Устройство для получения напряжений, компенсированных до удаленной точки нетранспонированной линии большой протяженности/ Аржаников Е. А. Оpubл. в Б. И., 1970, № 34.

19. Бринкис К. А., Паперно Л. Б. Избиратель поврежденной фазы для устройств ОАПВ подстанций на ответвлениях. — Ученые записки РПИ: Электроэнергетика, том XXVI, 1968, с. 151—157.

20. А. с. № 756535 (СССР). Многофазное направленное реле сопротивления/ Шабанов В. А. Оpubл. в Б. И., 1980, № 30.

21. Аржаников Е. А. Анализ функционирования фильтровых органов определения особой фазы и вида замыкания на линиях с двусторонним питанием. — Изв. вузов. Энергетика, 1982, № 7, с. 19—24.

22. Лосев С. В., Чернин А. Б. Исследование трехфазного направленного реле сопротивления при коротких замыканиях и в неполнофазных режимах. — Электричество, 1960, № 6, с. 29—38.

23. Аржаников Е. А. Многофазные реле сопротивления и их выполнение на принципе определения порядка следования импульсов. — Электричество, 1973, № 12, с. 8—12.

24. Аржаников Е. А. Влияние режима каскадного отключения однофазного замыкания на реле сопротивления избирательного органа ОАПВ. — Электрические станции, 1975, № 3, с. 64—66.

25. Дороднова Т. Н., Михайлова М. В., Рубинчик В. А. Исследование расчетных условий для выбора параметров характеристики срабатывания избирательных органов устройства ОАПВ. — Электричество, 1980, № 2, с. 15—21.

26. Аржаников Е. А., Чернин А. Б., Смирнова Т. В. К вопросу о применении реле сопротивления для выбора поврежденной фазы в схемах ОАПВ. — В кн.: Доклады научно-технической конференции по итогам научно-технической работы за 1968—1969 гг./ Секция электроэнергетическая, подсекция АиРЗ энергосистем. — М.: МЭИ, 1969, с. 98—107.

27. Аржаников Е. А. Учет граничных условий при расчете на ЦВМ сложных повреждений с использованием симметричных составляющих. — Изв. вузов. Энергетика, 1979, № 3, с. 8—13.

28. Дороднова Т. Н., Михайлова М. В. Выбор параметров характеристики срабатывания избирательных органов устройства ОАПВ. — В кн.: Автоматическое управление энергосистемами в аварийных режимах. — М.: Энергия, 1981, с. 10—21.

29. Коржецкая Т. А., Левнуш А. И. Некоторые принципы выполнения резервной защиты в цикле ОАПВ. — Электричество, № 8, 1978, с. 81—84.

30. Аржаников Е. А. Дистанционная защита и одностороннее определение места повреждения. — Электричество, 1982, № 8, с. 29—34.

31. Дексис Р.-П. Исследование способов и средств определения расстояния до места повреждения линий электропередач по параметрам аварийного режима. — Автореферат диссертации Каунасского политех. инст., 1975. — 24 с.

32. Суяр, Саркиз, Мутон. Развитие принципов измерения и выполнения систем защиты и определение места повреждения для трехфазных ВЛ. — В кн.: Релейная защита и противоаварийная автоматика (СИГРЭ-74). М.: Энергия, 1976, с. 20—33.

33. Рубинчик В. А., Чарова Н. Е. Дистанционная защита линий 110—330 кВ от однофазных КЗ. — В кн.: Автоматическое управление энергосистемами в аварийных режимах. — М.: Энергия, 1981, с. 168—174.

34. Рубинчик В. А. Поведение реле сопротивления, включенного на компенсированное напряжение поврежденной фазы, на линии с двухсторонним питанием. — Электричество, 1973, № 7, с. 11—17.

35. А. с. 847427 (СССР). Реле реактивного сопротивления защит от замыканий на землю/ Аржанников Е. А. Оpubл. в Б. И., 1981, № 26.

36. А. с. 338004 (СССР). Устройство для обнаружения замыкания на землю и для защиты отдельных участков линий трехфазной сети/ Суйард М. Э. П. Оpubл. в Б. И., 1972, № 15.

37. А. с. 890511 (СССР). Реле сопротивления защит от замыканий на землю/ Аржанников Е. А. Оpubл. в Б. И., 1981, № 46.

38. Аржанников Е. А. Многофазные реле сопротивления с регулируемой чувствительностью к переходным сопротивлениям. — Электричество, 1977, № 8, с. 71—73.

39. А. с. № 875527 (СССР). Измерительный орган дистанционной защиты от замыканий на землю/ Аржанников Е. А. Оpubл. в Б. И., 1981, № 39.

40. Рубинчик В. А. Действие многофазного компенсированного реле сопротивления при замыканиях на землю через переходное сопротивление. — Электричество, 1971, № 6, с. 61—67.

41. Эль-Хадиди М. А.-А. Исследование характеристик реле сопротивления дистанционных защит. — Автореферат диссертации МЭИ, 1979. — 20 с.

42. А. с. 597043 (СССР). Многофазное направленное реле сопротивления/ В. Л. Фабрикант, В. А. Шабанов. Оpubл. в Б. И., 1978, № 9.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Глава первая. Фиксация места КЗ на землю на линии электропередачи. Схемы для получения компенсированных напряжений . . . . .	6
1. Фиксация места металлического КЗ на линии с пофазно-симметричными сосредоточенными параметрами	
2. Функционирование реле, коэффициент компенсации которого не равен расчетному, при металлических КЗ . . . . .	10
3. Сопротивление на зажимах реле при металлическом КЗ на линиях с ответвлениями и на линиях с взаимной индукцией . . . . .	16
4. Влияние переходного сопротивления в месте КЗ на за-мер реле . . . . .	22
5. Сопротивление на зажимах реле при металлическом КЗ на нетранспонированной линии с сосредоточенными па-раметрами . . . . .	31
6. Сопротивление на зажимах реле при КЗ на линии боль-шой протяженности . . . . .	34
Глава вторая. Использование реле сопротивления для выбо-ра поврежденной фазы в схемах ОАПВ . . . . .	42
7. Требования к органу выбора поврежденной фазы. Основ-ные типы избирательных органов . . . . .	42
8. Направленные органы выбора особой фазы и определения вида КЗ . . . . .	44
9. Избирательные органы на основе реле сопротивления . . . . .	49
10. Расчеты электрических величин на зажимах реле в цик-ле ОАПВ. Возможности совершенствования органов вы-бора фазы . . . . .	63
Глава третья. Использование дистанционного принципа для одностороннего определения расстояния до места КЗ . . . . .	67
11. Определение расстояния до места КЗ на основе фикса-ции интегральных параметров аварийного режима на одной стороне линии . . . . .	67
12. Использование мгновенных значений электрических ве-личин для ООМП . . . . .	84
13. Возможности ООМП на параллельных линиях, линиях с обходными связями и линиях большой протяженности . . . . .	89
Глава четвертая. Дистанционный принцип в защитах от КЗ на землю . . . . .	96
14. Общие принципы дистанционных защит от КЗ на землю . . . . .	96
15. Измерительные органы дистанционных защит от КЗ на землю и влияние составляющих нагрузочного режима на их функционирование . . . . .	99

16. Измерительный орган на основе определения реактивной составляющей сопротивления до места КЗ	122
17. Статистическое сравнение различных исполнений измерительных органов	125
Глава пятая. Многофазные реле сопротивления защит от КЗ на землю	130
18. Методы анализа функционирования МРС	130
19. Симметричные МРС с регулируемой формой характеристики	139
20. Несимметричные МРС	150
21. Функционирование МРС при замыканиях в направлении, противоположном срабатыванию	154
Приложение П1. Основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений при КЗ на землю	158
Приложение П2. Построение граничных линий характеристик релейных устройств в плоскости общего параметра	161
Приложение П3. Расчетные выражения для определения сопротивлений на зажимах реле в различных режимах цикла ОАПВ	162
Приложение П4. Нахождение особых точек и линий плоскости $Z^{(1)}$ при однофазном КЗ	165
Приложение П5. Анализ функционирования МРС в плоскости $K_1$ и конформное преобразование осей плоскости $K_1$ на плоскость $Z^{(1)}$	167
Список литературы	171



Евгений Александрович Аржанников,

**ДИСТАНЦИОННЫЙ ПРИНЦИП В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ  
И АВТОМАТИКЕ ЛИНИЙ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ**

Редактор Д. Р. Любарский

Редактор издательства Л. М. Жданова

Обложка художника В. Ф. Громова

Художественные редакторы В. А. Гозак-Хозак, А. А. Белоус

Технический редактор Н. П. Собакина

Корректор Л. С. Тимохова

ИБ № 3029

Сдано в набор 19.12.84

Подписано в печать 15.04.85

T-09364

Формат 81 × 103<sup>1</sup>/<sub>32</sub> Бумага типографская № 3 Гарнитура литературная

Печать высокая Усл. печ. л. 9,21 Усл. кр.-отт. 9,45 Уч.-изд. л. 9,88

Тираж 7500 экз. Заказ 183 Цена 50 к.

Энергоатомиздат, 118114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография им. А. А. Жданова» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли, 113054, Москва, М-54, Валовая, -28